



VYTAUTAS DAUNORAS

**NUOTOLINĖS
ELEKTROS
APSKAITOS
PRIEMONIŲ
PAKLAIDŲ
STEBĖSENOS
METODAS**

DAKTARO DISERTACIJA

K a u n a s
2 0 2 1

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

VYTAUTAS DAUNORAS

NUOTOLINĖS ELEKTROS APSKAITOS
PRIEMONIŲ PAKLAIDŲ STEBĖSENOS
METODAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija (T 001)

2021, Kaunas

Disertacija rengta 2016–2020 metais Kauno technologijos universiteto Elektros ir elektronikos fakultete, Elektronikos inžinerijos katedroje.

Mokslinis vadovas:

Prof. dr. Žilvinas NAKUTIS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija, T 001).

Mokslinis konsultantas:

Prof. dr. Robertas LUKOČIUS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija, T 001).

Interneto svetainės, kurioje skelbiama disertacija, adresas:

<http://ktu.edu>

Redagavo:

Violeta Meiliūnaitė (leidykla „Technologija“)

Padėkos

Dėkoju doktorantūros komiteto nariams, ir išskirtinis ačiū darbo moksliniam vadovui prof. dr. Žilvinui Nakučiui bei moksliniam konsultantui doc. dr. Robertui Lukočiui už visokeriopą paramą doktorantūros studijų metu, ypač disertacijos ruošimo pabaigoje.

Dėkoju Audriui Merfeldui už konsultacijas bei suteiktą prieigą prie KTU „Fablab EMC“ laboratorijos įrangos, kuri buvo panaudota eksperimentiniuose tyrimuose.

Dėkoju savo tėvams už man sudarytas sąlygas ir palaikymą, ruošiant šią disertaciją.

Turinys

IVADAS	7
1 ELEKTROS SKAITIKLIŲ METROLOGINĖS PRIEŽIŪROS EKPLOATACIJOS METU METODŲ APŽVALGA.....	12
1.1 Statistinė patikra	12
1.2 Elektros energijos matuoklių paklaidos stebėsenos eksploatavimo metu metodai	15
1.2.1 Paklaidų stebėsenos metodai eksploatavimo vietoje	15
1.2.2 Metodai, panaudojantys galios vartojimo profilius	17
1.2.3 Integruotų darbinių etalonų taikymas	19
1.2.4 Nuotoliniai EEM paklaidų stebėsenos metodai	19
1.3 Skyriaus apibendrinimas.....	21
2 ELEKTROS ENERGIJOS MATUOKLIŲ NUOTOLINĖS PAKLaidŲ STEBĖSENOS METODAS.....	23
2.1 Metodo aprašas	23
2.2 Nuotolinių metodų taikymas elektros apskaitos priemonių metrologinei priežiūrai	28
2.2.1 Taikymas teisinės metrologijos srityje	29
2.2.2 Taikymas pramoninės metrologijos srityje.....	31
2.3 Metodo verifikavimo metodika	32
2.4 Reikalavimai galios matavimų sinchronizavimui.....	33
2.5 Skyriaus apibendrinimas.....	39
3 ELEKTROS ENERGIJOS MATUOKLIŲ NUOTOLINĖS STEBĖSENOS METODO PAKLaidŲ TYRIMAS.....	41
3.1 Sistemingosios metodo paklaidos tyrimas.....	41
3.1.1 Modelio sudarymas.....	41
3.1.2 Rezultatai.....	44
3.2 Atsitiktinės metodo paklaidos dėl galios fluktuacijų tyrimas	47
3.2.1 Galios fluktuacijų elektros tinkle kilmė.....	47
3.2.2 Galios fluktuacijų įtaka paklaidų stebėsenos metodo atsitiktinei paklaidai	47
3.2.3 Galios fluktuacijų įtakos mažinimo galimybių analizė.....	55

3.3	Skyriaus apibendrinimas.....	62
4	EKSPERIMENTINIS METODO VERIFIKAVIMAS BEI NEAPIBRĖŽTIES ANALIZĖ	63
4.1	Eksperimentinis PLC G3 sinchronizacijos galimybių tyrimas	63
4.2	Sistemos prototipo realizavimas	69
4.3	Tikrinamojo elektrinės galios matuoklio paklaidos nustatymas.....	72
4.4	Eksperimentinis metodo verifikavimas žemosios įtampos elektros skirstomajame tinkle.....	73
4.4.1	Eksperimentinių duomenų aibės.....	73
4.4.2	Tikrinamojo matuoklio pataisos koeficiento įvertinimas	77
4.5	Aktyviosios galios pataisos koeficiento neapibrėžties analizė	93
4.6	Skyriaus apibendrinimas.....	99
	IŠVADOS.....	101
	LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	102
	PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS.....	111
	PRIEDAI.....	113

SUTRUMPINIMAI:

EEM	– elektros energijos matuoklis
TM	– tikrinamasis elektros energijos matuoklis
PM	– pamatinis elektros energijos (etaloninis) matuoklis (angl. <i>Reference meter</i>)
SNTP	– angl. <i>Simple Network Time Protocol</i> (paprastasis tinklo laiko protokolas)
PKL	– priimtinas kokybės lygis
RK	– ribinės kokybės
PLC	– angl. <i>Power Line Communication</i> (elektros linijos ryšys)
NLK	– nulio lygio kirtimas
DI	– daiktų internetas
AMR	– angl. <i>Automatic meter reading</i> (automatinis skaitiklių nuskaitymas)
MPD	– matavimo priemonių direktyva
DRB	– duomenų rinkimo blokas
IG	– integruotas grandynas
ES	– elektros skaitiklis

IVADAS

Tyrimo aktualumas

Elektros energijos skaitikliai yra plačiai naudojami elektros energijos suvartojimo vartotojų ūkiuose, gamybos cechuose, bendrosioms paslaugoms, tokioms kaip apšvietimas bei oro kondicionavimas apskaitai ir energetinių auditų tikslais. Be tradicinių komercinės elektros energijos apskaitos priemonių, vis labiau plinta išankstinio apmokėjimo, subapskaitos ir suminės apskaitos skaitiklių bei tinklo būsenos stebėsenos matuoklių naudojimas [1–4]. Įvairūs išmanieji lizdai, išmanieji kištukai, išmanieji matuokliai, kaip priedai prie atsinaujinančios energijos inverterių, ir kt. sudaro besiplečiantį elektros energijos matuoklių (EEM) asortimentą. Komercinės apskaitos matuokliai patenka į teisinės metrologijos reguliavimo sritį, o jų matavimo rezultatai naudojami vartotojams apmokestinti. Taip pat, atsižvelgdamas į elektros energijos matuoklių rodmenis, vartotojas sprendžia apie patalpų, gamybos vietos ar kt. elektros energijos vartojimo efektyvumą. Tikimasi, kad išmaniųjų elektros energijos skaitiklių plėtra Europos Sąjungoje leis 3 % sumažinti elektros energijos suvartojimą dėl atsirandančių galimybių vartotojams koreguoti savo energetinę elgseną [5]. Taigi, pasitikėjimas energijos matuoklių matavimo patikimumu yra aktualus ne tik komercinėje apskaitoje teisingiems atsiskaitymams už pateiktą ir suvartotą energiją, bet ir priimant sprendimus bei vertinant energetinio efektyvumo gerinimo priemones. Dėl didelio rinkoje naudojamų komercinių ir nekomercinių energijos apskaitos priemonių kiekio jų metrologinės priežiūros kaštai yra dideli, įvertinant skaitiklio išmontavimo, transportavimo, pakaitinio skaitiklio instaliavimo ir patikros ar kalibravimo paslaugų įkainius. Todėl metrologinės priežiūros kaštams sumažinti yra naudojami statistinės (atrankinės) patikros metodai, kurie leidžia priimti sprendimą apie homogeniškos skaitiklių grupės atitiktį standartų reikalavimams, remiantis tik nedidelės dalies skaitiklių metrologine patikra. Statistinės patikros intervalai elektros skaitikliams įvairiose pasaulio šalyse yra gana ilgi, pvz., Lietuvoje 12 metų, o skaitiklių metrologinės charakteristikos netikrinamos iki šio intervalo pabaigos. Tiesa, matuokliai gali būti iš anksto tikrinami gavus vartotojo nusiskundimą. Tačiau, jeigu paklaidos padidėjimas nėra akivaizdus, tai net ir netenkinantis metrologinių reikalavimų skaitiklis gali būti eksploatuojamas daugelį metų, taip lemdamas finansinius nuostolius tiekėjui arba vartotojui. Išmaniųjų EEM energijos matavimo paklaidos tolygus didėjimas nėra pagrindinė neatitikties specifikuotiems reikalavimams priežastis [6], kadangi matuoklių vidinių komponentų gedimai gali sąlygoti staigų paklaidos pasikeitimą ir nulemti ženklus ekonominis nuostolius tiekėjui arba vartotojui [7]. Dėl šių priežasčių pastaruoju metu vis intensyviau ieškoma naujų būdų, kaip būtų galima atlikti nuotolinę EEM paklaidų stebėseną ir jos rezultatus panaudoti metrologinei priežiūrai eksploatacijos metu. Sprendžiant minimas problemas kyla darbo **mokslinė problema**: trūksta žinių, kaip nuotoliniu būdu stebėti elektros energijos matuoklių paklaidas, nepertraukiant

elektros tiekimo elektros vartotojui, bei kaip nustatyti tokiais stebėsenos metodais pasiekiamą paklaidos įvertinimo neapibrėžtį.

Įvairiose mokslinėse publikacijose bei techninėse ataskaitose yra svarstoma apie galimybę atlikti EEM paklaidų stebėseną be transportavimo į sertifikuotą laboratoriją. Šiuos metodus sieja tai, kad tikrinamasis elektros energijos matuoklis (TM) nėra išmontuojamas iš savo eksploatacijos vietos. Pagal pamatinio (etaloninio) matuoklio (PM) arba etaloninio matuojamo dydžio, pvz., etaloninės apkrovos prijungimą prie TM, gali būti išskiriami du nuotolinės stebėsenos tipai:

- 1) stebėseną matuoklio eksploatacijos vietoje (angl. *on-site verification*), kuriai reikalingas PM transportavimas į TM eksploataavimo vietą;
- 2) nuotolinę matuoklių stebėseną, kai PM ir TM yra vienas nuo kito nutolę, bet sujungti duomenų perdavimo ryšio kanalu.

Darbo mokslinė hipotezė formuluojama taip: EEM aktyviosios galios matavimo paklaidą galima praktikoje priimtinu tikslumu įvertinti nuotoliniu būdu ir jo neišmontuojant iš eksploatacijos vietos bei nenutraukiant energijos tiekimo vartotojui, panaudojant pamatinį energijos matuoklį, prijungtą tame pačiame skirstomojo tinklo potinklyje kaip ir tikrinamasis matuoklis. Prielaidos, kurių laikomasi iškeliant hipotezę yra tokios: matavimo vienetą perduodančios terpės (elektros tinklo) įnešamos sistemingosios paklaidos įtaka nuotolinės stebėsenos tikslumui yra paneigtina, o atsitiktinių paklaidų įtaka gali būti sumažinta iki pageidaujamos ribos, taikant daugkartinius matavimus ir jų rezultatų apdorojimą.

Nors teisinėje metrologijoje EEM paklaidų nuotolinės stebėsenos metodai kol kas nėra numatomi ar standartizuoti, bet jie galėtų būti išbandomi asmeninės ar pramoninės apskaitos (subapskaita) srityse. Tikimasi, kad teisinės metrologijos reguliuojamoje srityje nuotolinių paklaidos stebėsenos metodų rezultatai galėtų vaidinti pagalbinę rolę, pasirenkant neeilinės patikros laiko intervalus.

Kuriant nuotolinės EEM paklaidų stebėsenos metodus ir juos realizuojančius techninius sprendimus, patrauklumo vartotojui ir metrologinės priežiūros kaštų mažinimo požiūriu yra tikslinga siekti tokių savybių:

- 1) nebereikia EEM išmontavimo ir gabenimo į akredituotą laboratoriją;
- 2) EEM paklaidų stebėsenos metu vartotojo nereikia atjungti nuo elektros tinklo;
- 3) individualaus EEM paklaidos nustatymą galima užsisakyti kaip vienkartinę arba periodinę paslaugą.

Tyrimo tikslas ir uždaviniai

Daktaro **disertacijos tikslas** – sukurti ir ištirti nuotolinį žemos įtampos elektros skirstomųjų tinklų elektros energijos apskaitos prietaisų paklaidų stebėsenos metodą, panaudojant sinchronizuotą pamatinę matavimo priemonę, įjungtą elektros potinklio įvade.

Darbo tikslui pasiekti suformuluoti šie **uždaviniai**:

1. Pasiūlyti nuotolinį elektros energijos matuoklių paklaidų stebėsenos metodą, leidžiantį paklaidų stebėseną vykdyti nuotoliniu būdu nenutraukiant elektros energijos tiekimo vartotojui.
2. Atlikti metodo panaudojimo galimybių teisinės ir pramoninės metrologijos srityse analizę.
3. Atlikti nuotolinio TM paklaidos stebėsenos metodo verifikavimą matematinio modeliavimo būdu, nustatant sistemingosios matavimo paklaidos ribas tipiniame žemosios įtampos elektros skirstomajame tinkle.
4. Atlikti tinklo ir apkrovų įtakos TM paklaidos įvertinimo nuotoliniu būdu neapibrėžčiai analizę.
5. Sukurti metodą įgyvendinančią eksperimentinę sistemą ir ją pasinaudojus atlikti nuotolinio TM paklaidos stebėsenos metodo verifikavimą eksperimentiniu būdu tipiniame žemosios įtampos skirstomajame elektros tinkle, nustatant TM paklaidos įvertinimo neapibrėžtį.

Darbo mokslinis naujumas:

Rengiant disertaciją buvo gauti šie elektros ir elektronikos inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Pasiūlytas naujas nuotolinės EEM paklaidų stebėsenos metodas, nepertraukiant elektros tiekimo elektros vartotojui panaudojant sinchronizuotą pamatinę matavimo priemonę, įjungtą potinklio įvade.
2. Nustatytos pasiūlytu metodu pasiekiamos paklaidos tipiniuose žemosios įtampos elektros skirstomuosiuose tinkluose.

Praktinė darbo reikšmė

Disertacijoje gauti rezultatai panaudoti sukuriant nuotolinį aktyviosios galios paklaidų stebėsenos metodą bei apskaičiuojant juo pasiekiamą multiplikatyvinio aktyviosios galios pataisos koeficiento įvertinimo neapibrėžtį. Sukurto metodo įdiegimo atveju numatoma vertė yra geresnė elektros energijos vartotojų ir tiekėjų ekonominių interesų apsauga, įgalinant nuolatinę matavimo skaitiklių parko būsenos stebėseną, nesiunčiant aptarnaujančio personalo į skaitiklio įdiegimo vietą, jo neišmontuojant ir netransportuojant į metrologijos laboratoriją. Sukurtasis stebėsenos metodas neskirtas pakeisti galiojančios metrologinės priežiūros procedūrų, įteisintų nacionaliniuose teisės aktuose, tačiau jis leidžia kiekvienos elektros energijos matavimo priemonės būklės stebėseną intervaluose tarp metrologinių patikrų, o jo

rezultatai gali būti panaudoti identifikuoti pavienius skaitiklius, kurių metrologinės charakteristikos netenkina atitinkamų standartų reikalavimų.

Disertacijos tyrimų rezultatai buvo panaudoti vykdant:

1) KTU tarpsritinį / tarpkryptinį mokslo projektą „Nuotolinio elektros apskaitos prietaisų kalibravimo ir diagnostikos metodas (ELENOT)“, 2017;

2) KTU MTEPI fondo finansuotą mokslo projektą „Žemos įtampos elektros tinklų parametrų stebėsenos sinchronizavimo būdų tyrimas paskirstytomis matavimo priemonėmis“, 2018.

Rezultatų aprobacija

Disertacijos metu gauti moksliniai rezultatai buvo pateikti 8 publikacijose: 3 iš jų straipsniai leidiniuose, įrašytuose į mokslinės informacijos instituto (ISI Web of Science) referuojamų leidinių, turinčių citavimo indeksą, sąrašą, 5 publikacijos tarptautinių konferencijų, vykusių Splite (Kroatija), Bolonijoje (Italija), Liverpulyje (Didžioji Britanija), Turine (Italija), medžiagos rinkiniuose. Rezultatai taip pat pristatyti Lietuvoje (Pabariukų k. Kelmės r.) vykusioje konferencijoje bei mokslinių darbų konkurse Vilniuje.

Ginti pateikiami teiginiai:

1. Sukurtas naujas nuotolinis EEM paklaidų stebėsenos metodas, paremtas tikrinamojo matuoklio aktyviosios galios rodmenų palyginimu su PM rodmenimis. Šis metodas sudaro sąlygas pasiekti ne didesnę negu 0,31 % sistemingąją tikrinamojo matuoklio matavimo multiplikatyvinio pataisos koeficiento paklaidą, nepriklausomai nuo kitų tame pačiame žemos įtampos skirstomajame tinkle energiją vartojančių apkrovų.
2. Pasiūlytą metodą teisinės metrologijos srityje galima taikyti, siekiant greičiau aptikti EEM, kurių paklaida viršija leistiną ribą, dar prieš pasibaigiant patikros intervalui, o pramoninės metrologijos srityje – siekiant aptikti EEM paklaidos padidėjimą ir esant poreikiui koreguoti rodmenis.
3. Nutolusio matuoklio aktyviosios galios multiplikatyviojo pataisos koeficiento nustatymo atsitiktinę paklaidą įtakoja skirstomajame tinkle veikiančių elektros apkrovų trumpalaikės galios fluktuacijos ir vartojamos galios pokyčiai, kurių poveikį galima efektyviai mažinti, atliekant daugkartinius matavimus ir taikant vidurkinimo bei filtravimo procedūras.
4. Taikant pasiūlytąjį nuotolinės stebėsenos metodą, galima pasiekti tikrinamojo matuoklio multiplikatyviojo pataisos koeficiento standartinę santykinę neapibrėžtį, ne didesnę negu 9,4 %, kai pamatinio matuoklio instaliavimo vietoje matuojamai galiai neviršijant 5 kW, tikrinamojo matuoklio instaliavimo vietoje galia neviršija 0,5 kW, TM tikslumo klasė yra 1 arba 2, o PM tikslumo klasė yra 0,2 arba 0,5.

Disertacijos struktūra

Daktaro disertaciją sudaro įvadas, 4 skyriai, išvados, literatūros sąrašas ir mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas. Darbo apimtis – 114 puslapių, kuriuose pateikiami 77 paveikslai, 15 lentelių, 55 matematinės išraiškos ir 101 pavadinimo literatūros sąrašas.

I skyrius: Pirmajame skyriuje apžvelgti vietiniai bei nuotoliniai elektros energijos skaitiklių (matuoklių) paklaidos įvertinimo metodai.

II skyrius: Antrajame skyriuje aprašytas siūlomas nuotolinės elektros energijos skaitiklių paklaidų stebėsenos metodas.

III skyrius: Trečiajame skyriuje pateiktas pasiūlyto metodo sistemingosios paklaidos tyrimas ir gauti rezultatai, modeliuojant metodo taikymą tipiniame žemos įtampos skirstomajame tinkle. Taip pat skyriuje yra nagrinėjama galios fluktuacijų elektros tinkle įtaka momentinės aktyviosios galios matavimo atsitiktinėms paklaidoms, pasiūlyti šių paklaidų mažinimo būdai bei apibūdintas jų efektyvumas.

IV skyrius: Ketvirtajame skyriuje aprašytas nuotolinio EEM klaidų stebėsenos metodo patikrinimas, atliekant eksperimentinius tyrimus, bei aktyviosios galios matavimo pataisos koeficiento nustatymo neapibrėžties analizė.

1 ELEKTROS SKAITIKLIŲ METROLOGINĖS PRIEŽIŪROS EKSPLOATACIJOS METU METODŲ APŽVALGA

1.1 Statistinė patikra

Tarptautinė teisinės metrologijos organizacija (angl. *International Organization of Legal Metrology* (OIML)) tarptautinėje rekomendacijoje OIML R 46-1 dėl aktyvių elektros energijos skaitiklių [8] tarp daugelio metrologinių ir techninių reikalavimų išdėsto ir statistinės patikros reikalavimus. Rekomendacijoje nurodyti reikalavimai skaitiklių partijai, atrankos iš kontrolinės grupės, atrankinei patikrai atsitiktinai pateiktų skaitiklių ėmimas ir statistiniai tyrimai. Visų pirma atitinkamai nustatomi 1 % ir 7 % vadinamieji priimtino kokybės lygio (PKL) ir ribinės kokybės (RK) parametrai. RK vertė parenkama taip, kad būtų užtikrinta tikrinamųjų skaitiklių metrologinių charakteristikų atitiktis nustatytiems reikalavimams. PKL ir RK parametrai kilę iš ISO 2859-1:1999 [9] ir ISO 2859-2:1985 [10] standartų, kuriuose nurodyti tikrinimo imties parinkimo reikalavimai. Šie standartai aprašo tokias procedūras: tikrinamųjų skaitiklių suskirstymo į kontrolines grupes, patikros plano pasirinkimo, skaitiklių imties (imčių) iš kontrolinių grupių ėmimo, imties (imčių) skaitiklių patikros atlikimo, sprendimo apie kontrolinių grupių atitiktį arba neatitiktį bei rezultatų įforminimo tvarką.

Europos rinkoje aktyviosios energijos skaitikliai reglamentuojami Europos Parlamento ir Tarybos direktyva 2014/22/EC dėl vadinamosios Matavimo priemonių direktyvos (MPD) [11]. Direktyvos II prieduose F ir F1 aprašoma produkto (pvz., energijos skaitiklio) atitikties deklaracija, pagrįsta patikrinimu. Direktyvoje numatoma galimybė atitiktį patikrinti, tikrinant kiekvieną priemonę arba taikant statistinę patikrą. Atliekant statistinį patikrinimą, MPD reikalauja 95 % patikimumo lygmens, kai neatitiktis yra mažesnė nei 1 % (PKL), ir 5 % priėmimo tikimybės, kai neatitikimas yra mažesnis nei 7 % (RK). Kalbant apie PKL ir RK reikalavimus, MPD atitinka OIML R 46-1 [8] rekomendacijas. Siekiant praktiškai įgyvendinti statistinį patikrinimą pagal MPD, parengtas WELMEC vadovas [11], skirtas padėti atsakingoms įstaigoms rengiant tinkamus atitikties vertinimo atrankos planus. Šiuo WELMEC vadovu dažniausiai vadovaujasi patvirtinant nacionalinius statistinę patikrą reglamentuojančius aktus.

„OIML Guide 20“ [12] aprašomos eksploatuojamų komunalinių (įskaitant elektros) skaitiklių priežiūros procedūros, atliekant statistinę patikrą iki skaitiklių patikros galiojimo pabaigos momento. Jei skaitiklių atitiktis buvo nustatyta atliekant statistinę (atrankinę) patikrą, patikros galiojimo laikotarpis gali būti pratęstas, kaip numatyta nacionaliniuose aktuose. Nacionaliniai reglamentai, įskaitant atrankos planus, parengiami politiniu sprendimu, siekiant užtikrinti pasirinktą ekonominį vartotojų apsaugos lygį [12], [13]. Šie reglamentai atspindi atsakingos institucijos pasitikėjimą EEM patikimumu. Tačiau į rinką įžengus naujiems gamintojams ir

išmaniųjų skaitiklių tipams, vis sunkiau įvertinti naujų EEM patikimumą dėl istorinių duomenų trūkumo.

Kai kuriose šalyse, pvz., Vokietijoje, yra būtina elektros skaitiklių atitiktis standartų reikalavimams laikotarpiu iki numatomos kitos patikros [14], o ne tik atitikties patikros vykdymo metu. Tokiam atitikties į ateitį užtikrinimui galima didinti statistinės imties dydį, kaip parodoma [15], arba siaurinti leistinas paklaidų ribas tikrinant atitiktį, kaip parodoma [16]. Kitas būdas, kurį [15], [16] autoriai mato kaip perspektyvų, siekiant užtikrinti skaitiklių metrologinių charakteristikų atitiktį iki artimiausio patikros momento, yra nuotolinė nuolatinė stebėsena eksploataavimo metu.

Pakartotinės patikros laikas nustatomas taip, kad būtų subalansuota gamintojo ir elektros energijos vartotojo rizika, eksploatuojant didelius kiekius elektros energijos matuoklių. Publikacijos [17] autoriai siūlo ekonominio rizikos vertinimo analizę laikotarpiui iki artimiausios patikros apskaičiuoti. Faktinės matavimo skaitiklių paklaidos, elektros energijos kaina, aktyviosios galios vartojimo profiliai bei skaitiklių pakeitimo kaštai yra pagrindiniai rizikos veiksniai, nulemiantys artimiausios statistinės patikros momentą. Faktinės matavimo skaitiklių paklaidos galėtų būti įvertinamos nuolatos stebint jų vertes nuotoliniais būdais. Taip metrologinei priežiūrai panaudojama nuotolinė paklaidų stebėsena atliktų tik patariamąjį vaidmenį ir neprieštarauja galiojantiems nacionaliniams teisės aktams.

Pagal Europos Parlamento matavimo priemonių direktyvą (MPD) 2014/32/EU [18] yra reikalaujama, kad būtų vykdomos periodinės elektros, vandens, dujų ir centralizuoto šildymo skaitiklių patikros. Tačiau intervalas tarp periodinių patikrų yra palyginti ilgas ir priklauso nuo nacionalinių reglamentų. Anot WELMEC pateikiamos informacijos [19], pradinis patikros periodas skirtingose Europos valstybėse gali siekti nuo 10 iki 18 metų. Taip pat, remiantis statistinės patikros rezultatais, eksploatacijos intervalą galima pratęsti. 1 lentelėje pateikiama trumpa tipinių patikros intervalų skirtingose valstybėse apžvalga.

1 lentelė. Elektros skaitiklių (ES) patikros intervalai skirtingose valstybėse

Valstybė	Pastabos, išnašos
Japonija	Buitiniai matuokliai, priklausomi nuo vardinės srovės, yra tikrinami kas 7–10 metų [20]
Vokietija	Aktyvių elektromechaninių / elektroninių ES patikra ir jų atitikties testavimas vykdomi kas 8 / 16 metų [19]
Italija	Periodinė elektromechaninių ES patikra vykdoma jiems atidirbus 18 arba 15 metų [19]
Austrija	Patikra vykdoma kas 8–20 metų, priklausomai nuo matuoklio tipo [19]
Kroatija	Privalomas 8–16 metų pakartotinės ES patikros periodas [19]
Slovėnija	Pakartotinė statistinė patikra kas 4 metus [19]
Lietuva	Pirmoji atrankinė patikra vykdoma po 12 metų su galimybe darbą pratęsti dar 6 metus [19]
JAV, Niujorko valstija	Periodinė elektros matuoklių, įrengtų kliento patalpose, patikra vykdoma mažiausiai kas 8 metus [21]
Kanada	Pradinis pakartotinės patikros periodas yra 6–10 metų [22]
Pietų Afrikos Respublika	Visų energijos skaitiklių kalibravimas atliekamas kas 2–5 metus [23]

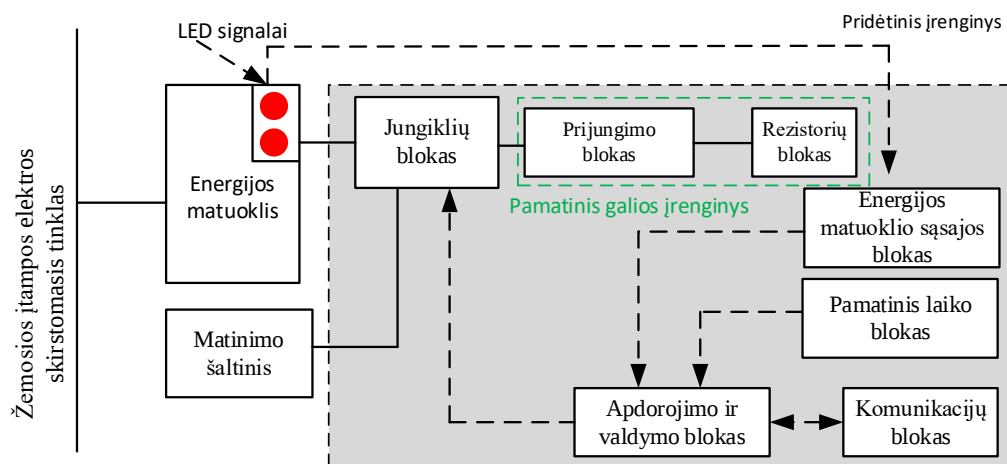
Šiuo metu statistinės patikros intervalas nusprendžiamas iš anksto ir jokia grįžtamoji informacija apie eksploatuojamų matuoklių paklaidas nevertinama (1 lent.). Nepaisant matuoklių tipų, paklaidoms viršijus leistiną limitą, jų stebėseną gali pagerinti metrologinę EEM priežiūrą eksploatacijos metu. Tačiau paklaidų stebėsenos informacija gali būti panaudota nusprendžiant pakeisti konkrečius skaitiklius, nutraukti skaitiklių grupės eksploataciją arba inicijuoti statistinę patikrą dar nepasibaigus suplanuotos patikros intervalui.

Matavimo rezultatų patikimumas ilgainiui mažėja, kadangi EEM yra veikiamas šiluminių, elektromagnetinių, mechaninių ir cheminių veiksnių, pasireiškia vidinio elektroninių komponentų senėjimo reiškinių įtaka. Kaip matoma 1 lentelėje, matuoklių eksploatavimo trukmė iki patikros periodo pabaigos yra gana ilga. Dažnesnė visų matuoklių patikra lemtų metrologinės priežiūros kaštų padidėjimą, kurį elektros energijos tiekėjai dažniausiai įskaičiuoja į elektros tarifus. Todėl kaip kompromisas atliekama statistinė patikra, nors ji atskirų matuoklių neatitikties (angl. *conformance*) aptikimo tikimybę sumažina tik statistiškai. Tuo tarpu nuotolinės stebėsenos metodai įgalintų galimai neatitinkančių standartų reikalavimams skaitiklių ir jų grupių aptikimą daug greičiau, lyginant su iš anksto suplanuotu patikros momentu.

1.2 Elektros energijos matuoklių paklaidos stebėsenos eksploatavimo metu metodai

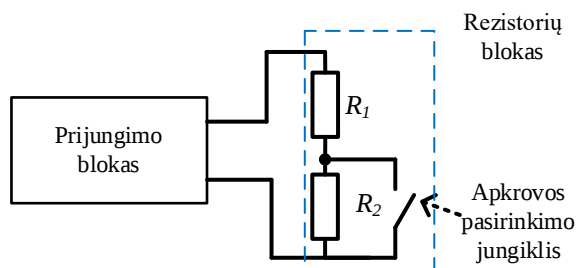
1.2.1 Paklaidų stebėsenos metodai eksploatavimo vietoje

Yra žinomi keli elektros energijos skaitiklių paklaidų stebėsenos eksploatacijos vietoje (angl. *on-site*) metodų. Paklaidų stebėsenos eksploatacijos vietoje metodai paremti: 1) portatyvios etaloninės apkrovos energijos matavimu ir lyginimu su TM rodmenimis [24], [25] arba 2) elektros srovės bei įtampos matavimo kanalų žadinimu, naudojant vidinius pamatinius įtampos bei srovės šaltinius [26]. Metodų privalumas yra tai, kad TM nėra transportuojamas iš savo eksploatacijos vietos.



1.1 pav. Elektros energijos skaitiklio patikra eksploatacijos vietoje, prijungiant papildomą pamatinį galios įrenginį [24]

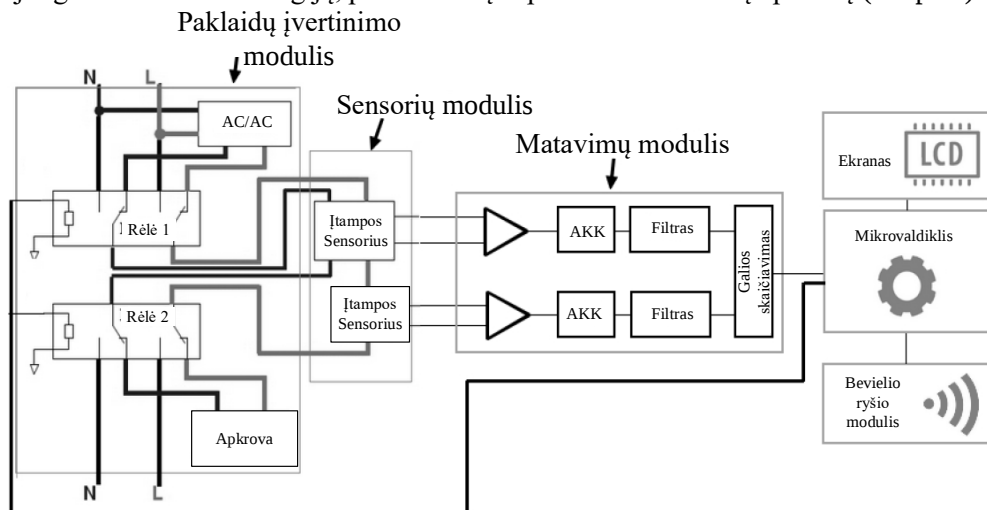
[24] šaltinyje siūlomas nebrangus išmanusis įrenginys, turintis optinę sąsają su kiekvienu TM, kuriam gali atlikti paklaidos įvertinimo procedūrą. Metodo esmė yra pamatinės apkrovos, kuri turi suvartoti žinomą elektros galios kiekį laiko trukmės išmatavimas, kuris nepriklauso nuo tinklo būklės. Tokiu būdu EEM paklaidos įvertinimui nereikia matuoti įtampos, tekančios srovės per apkrovą ar generuoti pamatinės įtampos. Pagrindinis siūlomo metodo modulis yra pamatinė apkrova, kurią sudaro prijungimo blokas ir rezistorių blokas. Rezistorių blokas susideda iš precizinių varžų banko, leidžia pasirinkti suvartojamą galią pagal schemą, pavaizduotą [24] (1.2 pav.).



1.2 pav. Rezistorių bloko schema [24]

Rezistorių blokas yra maitinamas nuolatine pamatine įtampa, kuri sukurama kondicionavimo bloke. Pasitelkus rezistorių bloką yra realizuojamos 300 W ir 600 W aktyviosios galios apkrovos, kurios atitinka 10 % ir 20 % tipinio buitinio tinklo įvado galios [24].

[25] yra aprašytas panašus kaip [24] metodas, panaudojant papildomą pridėtinį įrenginį (angl. *add-on device*). Pridėtiniame įrenginyje yra realizuotas pamatinės kintamos įtampos šaltinis, kuris prijungiamas prie etaloninės apkrovos. TM prijungiamas matuoti energiją, perduodamą iš pamatinio šaltinio į apkrovą (1.3 pav.).



1.3 pav. Elektros energijos matuoklio blokinė schema [25]

Papildoma apkrova bei pamatinės kintamos įtampos šaltinis (AC/AC keitiklis) pasitelkus reles yra prijungiamas prie TM. TM paklaidų įvertinimo metu elektros energijos tiekimas vartotojui turi būti nutrauktas [25].

Eksploatacijos vietoje taikomų metodų trūkumai yra tokie:

- 1) paklaidų nustatymo metu elektros energijos vartotojo elektrinės apkrovos turi būti atjungiamos;
- 2) precizinės apkrovos ir precizinio šaltinio tikslumas turi būti bent tris kartus didesnis nei TM.

1.2.2 Metodai, panaudojantys galios vartojimo profilius

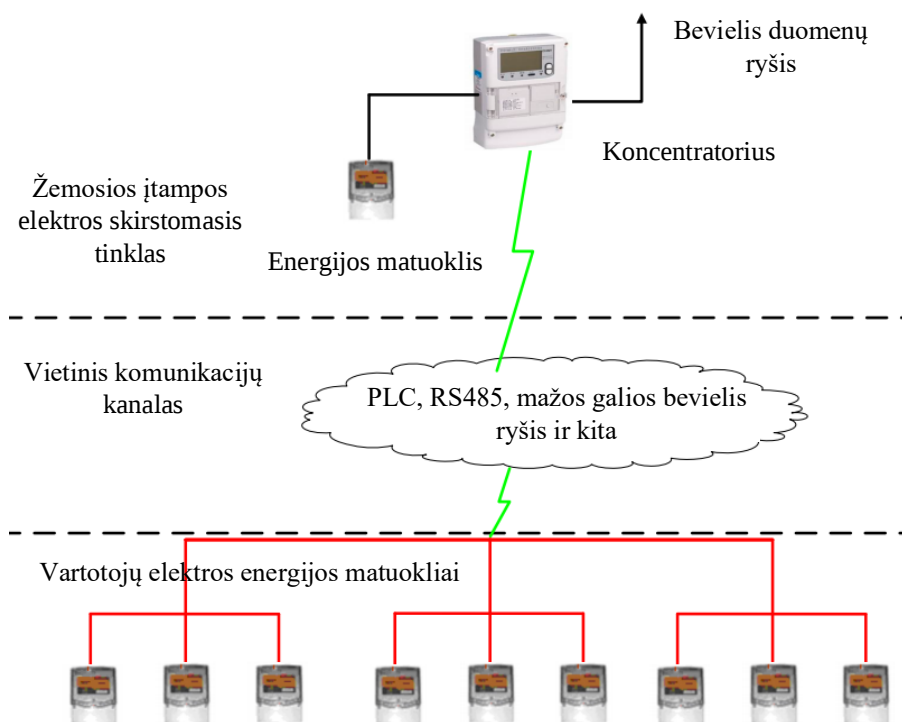
Žvelgiant plačiau, pastaruoju metu įvairūs autoriai aptaria išmaniųjų jutiklių ir kibernetinių (angl. *Cyber-physical*) sistemų nuotolinę (kai kurie autoriai vartoja sąvoką „bekontaktę“ (angl. *Touchless*)) metrologinę savitikrą [26–28]. Nuotolinės EEM stebėsenos metodai nuodugniau yra aptariami darbuose [29–31]. [29] bei [30] šaltinių autoriai analizuoja nuotolinės elektros skaitiklių paklaidų stebėsenos metodą, panaudojantį energijos suvartojimo matavimus, surenkamus automatinėmis skaitiklių nuskaitymo (angl. AMR – *automatic meter reading*) sistemomis (1.5 pav.). Šiam metodui realizuoti reikalingi sinchronizuoti visų tinklo TM ir PM galios suvartojimo parodymai. Tuomet, panaudojant regresijos modelį, yra įvertinamas vektorius, sudarytas iš atskirų matuoklių pataisos koeficientų. Šio metodo privalumai yra tokie:

1. Netrikdo elektros energijos tiekimo, t. y. elektros apkrovos neprivalo būti atjungiamos bandymų metu.
2. Nereikalauja jokių TM modifikacijų ar papildomų modulių.
3. Nereikalauja, kad PM arba precizinė apkrova / šaltinis būtų transportuojami į TM eksploatacijos vietą.

Šio metodo trūkumai yra tokie:

1. Jei koreliacija tarp atskirų TM energijos sąnaudų yra stipri, šių TM pataisos koeficientai įvertinami netiksliai.
2. TM pataisos koeficientų tikslumas yra įtakojamas tinkle neapskaitomų energijos suvartojimo arba elektros energijos vagysčių.
3. Jei prie TM prijungtas elektros energijos vartotojas nevartoja elektros energijos, jo TM paklaidų neįmanoma tiksliai įvertinti.

[31] šaltinyje aprašomas nuotolinis metodas vienalaikiam matuoklių klaidų vertinimui (1.4 pav.). Autoriai pateikia algoritmą, skirtą apskaičiuoti kartu ir linijų nuostolius (charakterizuojant PM ir TM sujungiančią terpę), ir TM paklaidas, panaudojant AMR duomenis. Remdamiesi modeliavimo duomenimis autoriai nustato, jog metodas užtikrina mažiau nei 2 % tikimybę klaidingai aptikti reikalavimų neatitinkančius matuoklius.



1.4 pav. Elektros matuoklių parodymų nuskaitymo sistemos struktūra [31]

[32], [33] šaltiniuose yra siūlomas anomalijų aptikimo metodas, siekiantis tuo pačiu aptikti elektros vagystes bei matuoklius, pasižyminčius reikalavimų neatitinkančiu matavimo tikslumu. Metodas remiasi elektros energijos vartotojų išmaniųjų matuoklių bei pagrindinio matuoklio (vadinamo kolektoriumi), matuojančio rajono tinklo bendrą suvartotą elektros energiją, elektros energijos vartojimo profiliais. Kadangi šis metodas padeda atskirti vagystes nuo matuoklių paklaidų, jį galima taikyti matuoklių partijos būklės įvertinimui bei metrologinei priežiūrai EMM eksploatacijos metu. Tačiau šio metodo pritaikymo galimybė autorių nėra taip gerai išanalizuota, kaip santykis tarp anomalijų koeficiento dydžio bei kiekvieno išmaniojo matuoklio energijos matavimo paklaidų. Taip pat šis metodas kartu vertina visų matuoklių parodymų anomaliskumą, bet negali atlikti individualios pavienio EMM paklaidos patikrinimo.

[34] šaltinyje aptariamas išmaniųjų matuoklių panaudojimas netechniniams elektros energijos perdavimo nuostoliams aptikti. Netechniniai nuostoliai apima elektros vagystes bei matuoklių paklaidas. Patikimi matuoklio matavimų rodmenys leidžia identifikuoti energijos vagysčių mastą bei numatyti jų vietą tinkle. Kita vertus, netechninius nuostolius apskaičiuojantis metodas taip pat gali padėti rasti matuoklius, kurių paklaidos galimai viršija leistinas ribas bei šiuos matuoklius būtų tikslinga

metrologiškai patikrinti laboratorinėmis sąlygomis pagal galiojančią patikros metodiką.

Taikant nuotolinio stebėjimo metodus, PM atlieka pamatinės priemonės rolę. Šiuo metu PM nėra privalomi žemosios įtampos elektros skirstymo tinkluose. Vis dėlto žinoma, kad panaudojamų suminių matuoklių, kurie diegiami PM tinkamose tinklo vietose, skaičius auga. Pavyzdžiui, pastatų savininkai dažnai naudoja suminius matuoklius, matuojant kiekvieno nuomojamo objekto sunaudojamą energiją atskirai. Viso pastato elektros sąskaitas savininkai dažnai apmoka pagal komercinio matuoklio rodmenis. Subskaitikliai leidžia savininkams atskirti energijos kiekius, suvartotus skirtingų nuomininkų. Subskaitikliai taip pat leidžia nuomininkams pasinaudoti galimybe nepermokėti už elektros energiją [35]. Suminiai matuokliai gali būti naudojami neapskaitomam elektros energijos vartojimui (elektros vagystei arba nelegalioms apkrovoms) aptikti [36]. Suminių matuoklių bei subskaitiklių duomenų apdorojimas yra panaudojamas aptikti melagingų duomenų injekcijas pažangioje matavimo infrastruktūroje bei sustiprinti tinklo apsaugą [37]. Kaip apibendrinama [38] šaltinyje, matavimas subskaitikliais yra naudingas ir rekomenduojamas atliekant elektros energijos matavimus, siekiant padidinti vartojimo efektyvumą. Kai kurie reglamentai, tokie kaip Elektros energijos pramonės (matavimo) kodas 2012 Australijoje [39], jau yra aprašę reikalavimus, keliamus suminių (patikros) matuoklių įrengimui [40]. Metrologijos procedūroje, papildančioje elektros energijos pramonės (matavimo) kodą, aprašomas elektros energijos duomenų verifikavimas esant pilnai arba dalinai įrengtiems patikros matuokliams [41].

1.2.3 Integruotų darbinių etalonų taikymas

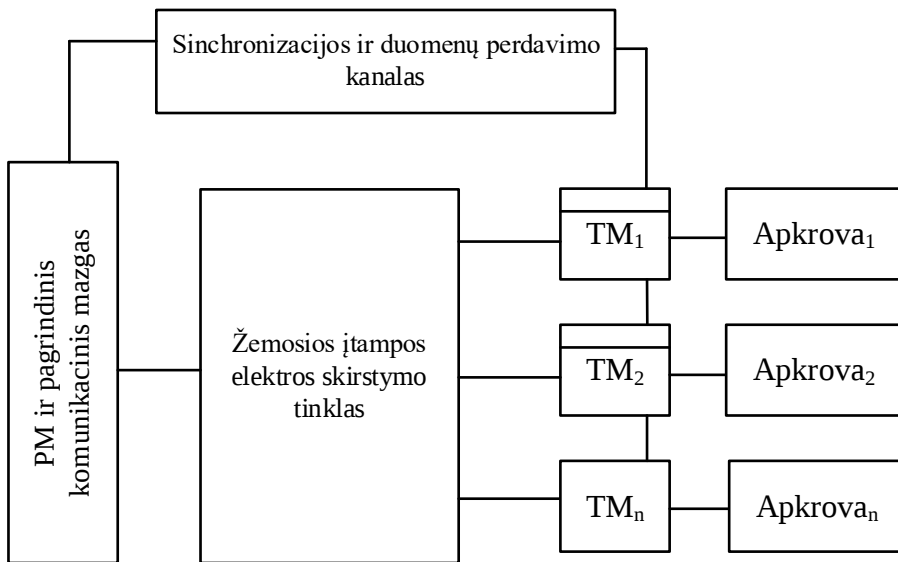
Pastaruoju metu literatūroje minimi keletas matuoklių autokalibravimo (derinimo eksploatacijos vietoje) sprendimų, kurių nederėtų painioti su metrologine stebėsena. Pavyzdžiui, „Analog Devices Inc.“ pristatė savo „mSure“ technologiją, skirtą automatinei srovės ir įtampos kanalų paklaidų stebėsenai, nenaudojant išorinio etaloninio šaltinio arba išorinio etaloninio matuoklio [42]. Taip pat „Nexus“ komercinis elektros energijos kokybės matuoklis 1500+, pagamintas „Electro Industries/Gaugetech“, koreguoja savo rodmenis kas 10 sekundžių, remdamasis vidiniu etalonu [43]. [44] ir [45] šaltiniuose yra aprašytas metodas, paremtas srovės ir įtampos matavimo kanalų žadinimu etalonine sinusinės formos įtampa su žinomu dažniu ir amplitude.

1.2.4 Nuotoliniai EEM paklaidų stebėsenos metodai

Kalbant apie metrologines procedūras, terminas „nuotolinis“ yra dažnai vartojamas skirtingomis prasmėmis, tiksliai jo neapibrėžiant, išskyrus bandymą apibūdinti „nuotolinio kalibravimo“ sąvoką [46] šaltinyje. Pagal šį dokumentą, Nacionalinio metrologijos instituto atliekamas kalibravimas apibrėžiamas kaip nuotolinis, jeigu kalibruojama priemonė yra įrengta ne laboratorijos patalpose, skirtose kalibravimui atlikti, taikant reikiamas matavimo priemones ir perduodant su

kalibravimu susijusią informaciją klientui bei tiesiogiai nedalyvaujant akredituotos laboratorijos personalui. Šis apibrėžimas yra tinkamas kaip atsparos taškas, apibrėžiant nuotolinio elektros energijos matuoklių paklaidų stebėsenos sąvoką. Nutolimas pažymi ne fizinius atstumo apribojimus, o veikiau būdą, kuriuo PM ir TM yra tarpusavyje sujungti. Pirmiausia, TM turi likti savo įprastoje darbo vietoje. PM turi būti sujungtas su terpe, gebančia perduoti matuojamus dydžius. PM vietoje, tinkamoje žemosios įtamos elektros skirstymo tinkle esančiai TM grupei stebėti, gali būti įrengtas stacionariai arba prijungiamas laikinai paklaidos stebėsenai atlikti. Šį aspektą norėtumėme praplėsti neapsiribojant mobiliuoju etalonu, kuris paprastai įrengiamas ir jungiamas tiesiogiai su TM bei kurio kontrolė vykdoma nuotoliniu būdu [47]. Nuotolinės paklaidų stebėsenos paslaugas teikiančios įstaigos personalas procesą gali valdyti nuotoliniu būdu, tačiau jis neturėtų lankytis vietoje, kurioje įrengtas TM. Nuotoliniam elektros energijos matuoklių paklaidų stebėjimui duomenų perdavimo kanalą tarp PM ir TM reikia paruošti iš anksto.

Nuotolinio paklaidų stebėsenos metodo adaptavimo EEM-iams schema pavaizduota 1.5 pav. Ji apima PM bei tikrinamuosius matuoklius, elektros skirstomąjį tinklą, kaip matuoklius jungiančią terpę, e. matavimų sinchronizavimo kanalą ir duomenų perdavimo tinklą.



1.5 pav. Nuotolinės EEM paklaidų stebėsenos darbo metu metodo blokinė schema

Naudojantis tokia sistema atliekama EEM paklaidų stebėseną pasižymi tokiomis savybėmis:

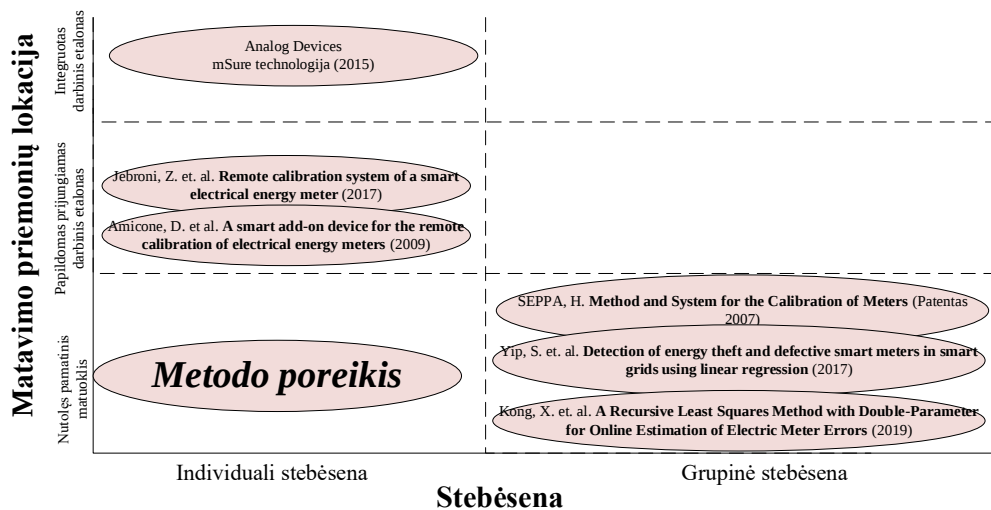
1. TM paklaidų apskaičiavimas yra atliekamas, esant tiems elektros energijos vartojimo kiekiams, kurie yra įprasti atitinkamo elektros energijos vartotojo elektros energijos vartojimo profiliui. Šie elektros energijos kiekiai gali neatitikti kiekių, nurodytų matuokliui taikomuose standartuose. Taip pat TM darbo

aplinkos sąlygos gali skirtis nuo standartinių atitikties bandymų sąlygų. Abu šie faktai lemia tai, kad procedūra ima nebeatitikti teisiųjų valstybės reglamentų, todėl laboratorinės patikros pakeisti nuotoliniu stebėjimu formaliai negalima. Tačiau paklaidų apskaičiavimą privaloma atlikti naudojant tiksliai apibrėžtus matavimo diapazono taškus, kad priežiūros institucijų atstovams būtų lengviau priimti sprendimus dėl tolesnio matuoklio naudojimo. Nuotolinės paklaidų stebėsenos tikslas nėra atlikti teisinę patikrą, o veikiau gauti apytikslę informaciją apie bendrą veikiančio matuoklio metrologinę būklę. Be to, matuoklio tikslumo vertinimas jo darbo vietoje yra prasmingas nepaisant priežasčių, dėl kurių gali padidėti paklaidos (esant tam tikroms aplinkos sąlygoms arba dėl senėjimo reiškinių). Matuoklių paklaidos nuotolinės stebėsenos (pataisos koeficiento apskaičiavimo) metodas yra pagrįstas aktyviosios energijos tvermės dėsniu. Nustatant TM bei PM elektros energijos matavimo neapibrėžtis turi būti atsižvelgiama į matuoklių eksploatavimo vietose veikiančių sąlygų įtaką. Šios neapibrėžtys turi įtakos TM pataisos koeficiento nustatymo neapibrėžčiai.

2. Matuoklius jungiančios terpės būsena gali veikti momento, kurio metu vykdyti paklaidų stebėseną, pasirinkimą. Pavyzdžiui, mažesnis bendras galios suvartojimas žemosios įtampos elektros skirstomajame tinkle bei mažesnė elektros energijos svyravimų tikimybė lems tai, jog TM paklaidų apskaičiavimų neapibrėžties minimalizavimą palankiausia vykdyti naktį, kai dauguma vartotojų miega.
3. Paklaidos dydžiui sumažinti, nuotoliniu būdu paklaidos gali būti nustatomos remiantis ganėtinai dideliu pakartotinių matavimų kiekiu, vėliau paklaidų įverčius vidurkinant. Atsitiktinės paklaidos sukeltos ne tik vidinių TM bei PM paklaidų, bet ir trumpalaikių, matuoklius jungiančioje terpėje pasitaikančių, elektros energijos vartojimo bei įtampos svyravimų [48].
4. Nuotoliniam stebėjimui įvesti reikalingi matavimų sinchronizacijos bei duomenų rinkimo kanalai. Pastarieji paprastai naudojami išmaniosiose matavimo sistemose bei pažangioje matavimo infrastruktūroje. Sinchronizacijos tikslumui užtikrinti keliama reikalavimai gali priklausyti nuo taikomo metodo. Taikant [31–32] šaltiniuose pristatomą metodą, reikalingas suminio matuoklio kartu su visais TM išmatuotas per vienos valandos laikotarpį suvartojamos elektros energijos kiekis.

1.3 Skyriaus apibendrinimas

Skyriuje apžvelgti metodai, skirti įvertinti elektros energijos matuoklių paklaidas eksploatacijos metu: statistinė patikra, įvertinimas matuoklio eksploatacijos vietoje, metodai, panaudojantys suvartojamos aktyviosios galios profilius, bei nuotolinės paklaidų stebėsenos metodai. Lyginant šiuos metodus, galima išskirti tokius kriterijus: 1) pamatinės matavimo priemonės lokacijos (integruota, transportuojama ar nutolusi), 2) stebėsenos pobūdžio (individuali ar grupinė) (1.6 pav.), 3) vartotojo atjungimas nuo tinklo tikrinimo metu, 4) reikalavimai pamatinei priemonei, 5) suderinamumas su teisine metrologijos nuostatomis.



1.6 pav. Energijos matuoklių paklaidų stebėsenos metodų žemėlapis

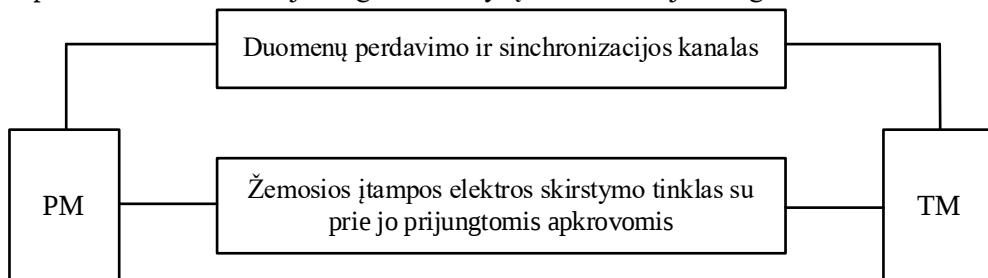
Pastebėtina, kad skirtingi metodai neišvengia įvairių trūkumų, pvz., paklaidų nustatymo eksploatacijos vietoje metodai reikalauja etaloninių priemonių transportavimo į EEM eksploatacijos vietą, taip pat ir vartotojo atjungimo nuo tinklo tikrinimo metu. Nuotoliniai grupiniai metodai skirti visos grupės skaitiklių paklaidų įvertinimui, todėl neleidžia individualios pasirinkto skaitiklio paklaidos stebėsenos. Be to, grupinės stebėsenos metodai kelia reikalavimus vartojamos energijos profiliui, pvz., jeigu stebėjimo periodo metu kurio nors skaitiklio vartojama energija nekinta, tai jo paklaidų nustatymo neapibrėžtis bus didelė. Statistinė patikra iš anksto nustatyto patikros intervalo pabaigoje negali užtikrinti degraduojančių EMM metrologinių charakteristikų savalaikio aptikimo, taip sukeliant ekonominių nuostolių riziką tiek pavieniams vartotojams, tiek tiekėjui. Taigi, remiantis atlikta metodų analize manome, kad egzistuoja poreikis ir nėra pakankamai žinių, kaip sukurti nuotolinės stebėsenos metodą, galintį eksploatacijos metu nuolatos ir nuotoliniu būdu stebėti individualių EEM paklaidas, netransportuojant etaloninių priemonių į matuoklio eksploatacijos vietą bei neatjungiant elektros energijos tiekimo vartotojui tikrinimo metu (1.6 pav. žemėlapyje pažymėta „Metodo poreikis“). Kitame skyriuje yra pasiūlytas šias sąlygas atitinkantis EMM paklaidų stebėsenos metodas.

2 ELEKTROS ENERGIJOS MATUOKLIŲ NUOTOLINĖS PAKLAIDŲ STEBĖSENOS METODAS

2.1 Metodo aprašas

Šiame skyriuje yra aprašytas darbe siūlomas metodas, skirtas įvertinti TM aktyviosios galios matavimo rodmenų multiplikatyvinį pataisos koeficientą nuotoliniu būdu.

Būtinose sąlygose nuotolinio TM paklaidų stebėsenos įgyvendinimui pavaizduotos 2.1 paveiksle. Jos iš esmės apima duomenų perdavimo ir sinchronizacijos kanalo tarp PM ir TM įgyvendinimą. Būtina įdiegti tam tikras galios matavimo laiko intervalų sinchronizavimo priemones, pavyzdžiui, siunčiant komandas iš PM į TM, kad būtų galima išmatuoti galios rodmenis per pasirinktą laiko intervalą, pvz., keletą sekundžių. PM turi būti prijungtas prie to paties elektros tinklo taip, kad visa TM matuojama galia sudarytų PM išmatuojamos galios.



2.1 pav. Siūlomo nuotolinio TM paklaidų stebėsenos metodo blokinė diagrama

Šio metodo tikslas – nustatyti TM multiplikatyvinę aktyviosios galios pataisos koeficiento reikšmę. Multiplikatyvinis aktyviosios galios pataisos koeficientas apibrėžiamas taip:

$$C_p = \frac{P}{P^*}, \quad (1)$$

čia – P yra tikroji aktyviosios galios vertė, o P^* – tikrinamojo elektrinės galios matuoklio aktyviosios galios rodmenys.

Suvartojama elektros energija yra apskaičiuojama pagal tokią formulę:

$$E = P \cdot t, \quad (2)$$

čia P – galia, t – laikas.

Kaip matome iš (2) išraiškos, energijos matavimo tikslumas priklauso nuo laiko matavimo, kurį nulemia kvarcinių osciliatorių stabilumas. Tačiau šiuolaikinėse sistemose naudojamų kvarcinių osciliatorių, kurių tipiniai dažniai yra 8 MHz ir daugiau, dažnio stabilumas paprastai yra apie 50 ppm (0,005 %) [49]. Trumpame keleto sekundžių intervale (kol yra vykdomas paklaidos nustatymas) dviejų skaitiklių laiko matavimo intervalo skirtumas bus labai mažas ir jo įtaka paklaidos nustatymui yra nereikšminga palyginus su matuoklio tikslumo klase. Elektros energijos

matuoklių tikslumo klasės gali būti įvairios, priklausomai nuo matuoklio tipo, jos aprašomos standartais [50]:

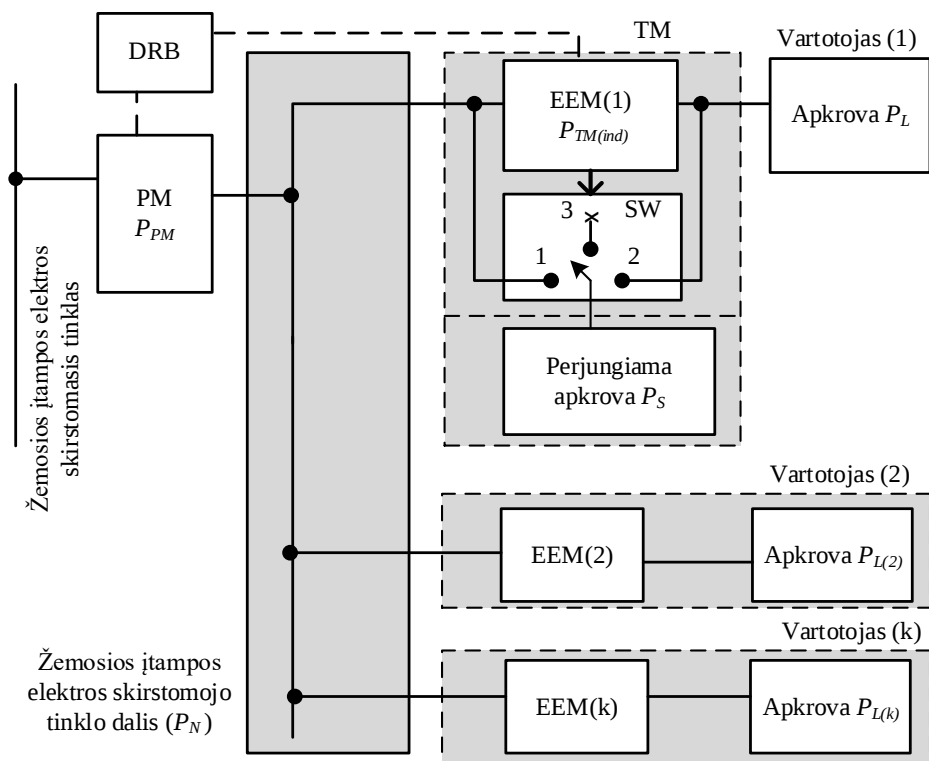
- 1) IEC/AS Standard 62053-11 – aprašo elektromechaninių energijos skaitiklių 0,5, 1,0 ir 2 tikslumo klases;
- 2) IEC/AS Standard 62053-11 – aprašo statinių arba skaitmeninių skaitiklių 1,0 ir 2 tikslumo klases;
- 3) IEC/AS Standard 62053-22 – aprašo aukšto tikslumo statinių arba skaitmeninių skaitiklių 0,2 ir 0,5 tikslumo klases.

Taigi laiko išmatavimo įtaka paklaidos nustatymui yra keliomis eilėmis mažesnė palyginus su tikslumo klase. Vadinasi, energijos ir paklaidos bus labai artimos galios paklaidoms. Dėl to toliau darbe tiriamas aktyviosios galios paklaidų stebėsenos metodas.

Metodo realizavimą aprašanti struktūrinė schema yra pavaizduota 2.2 pav., o jo realizavimo sekų diagrama – 2.3 pav.

Prielaidos, kuriomis remtasi sukuriant metodą, yra šios:

- 1) žemosios įtampos elektros skirstymo tinkle įrengtas PM, kuris yra nutolęs nuo TM, kaip parodyta 2.2 pav.;
- 2) TM vietoje galima laikinai prijungti ir atjungti sąlyginai nedidelę (~10 W) papildomą aktyviosios galios apkrovą (stimulą);
- 3) turi būti galimybė išmatuoti sinchronizuotus suvartojamos aktyviosios galios rodmenis iš PM bei TM;
- 4) elektros galios nuostoliai ir įtampos svyravimai dėl papildomos apkrovos būsenos (išjungtos ar įjungtos) yra nereikšmingi;
- 5) vienos pataisos koeficiento imties nustatymo intervale (apie keletą sekundžių) visų tinkle prijungtų apkrovų vartojama galia nekinta (yra stabili).



2.2 pav. Siūlomos EEM paklaidų stebėsenos metodo realizavimo schema: PM – pamatinis matuoklis, TM – tikrinamasis matuoklis, DRB – duomenų rinkimo blokas, SW – jungiklio blokas, P_S – perjungiamos apkrovos suvartojama elektrinė galia, o P_L – išmatuotas vartotojo apkrovos elektrinės galios dydis

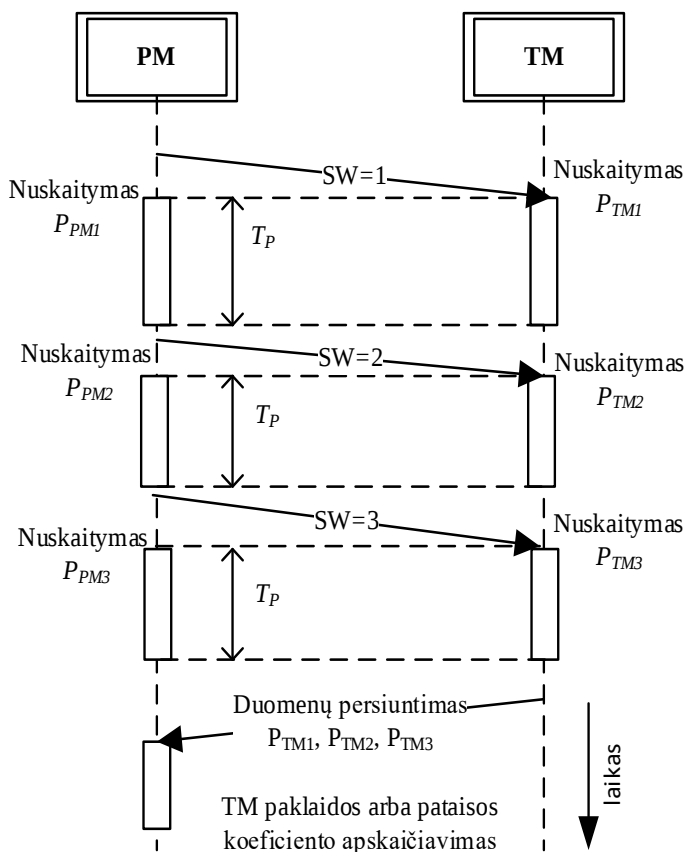
Energija vartotojo apkrovai P_L yra tiekama per žemosios įtamos elektros skirstymo tinklą. Galia, suvartojama skirstomajame tinkle $P_N = P_{PM} - P_{TM}$, modeliuoja nuostolius paskirstymo linijose ir kitų vartotojų (išskyrus konkretaus TM matuojamą energiją) elektros energijos vartojimą. Pataisos koeficiento įvertinimo procedūra turi būti baigta tokiu laiko intervalu, per kurį visų tame tinkle esančių apkrovų aktyviosios galios yra pastovios. Duomenų rinkimo blokas (DRB), kuris paprastai jungiamas su PM, siunčia nurodymus perjungti jungiklį (SW) į vieną iš galimų padėčių. Tuomet per sutartą laiką T_p , pavyzdžiui, 1 ar 2 sekundes, abu matuokliai atlieka sinchronizuotus elektrinės galios vartojimo matavimus. Remiantis šiais matavimo rezultatais yra įvertinama TM paklaida, aprašoma multiplikatyviniu pataisos koeficientu C_p .

Nuotolinei paklaidų stebėsenai prie TM turi būti įdiegta perjungiamą apkrova, kaip parodyta 2.2 pav. Ši apkrova gali būti integruojama TM viduje arba prijungiama prie jo iš išorės per tam tikslui numatytus prijungimo taškus. Perjungiamos apkrovos

tikslumas nėra svarbus, kadangi ji neatlieka etaloninio prietaiso vaidmens, o yra naudojama tik kaip stimulus, kuris synchronizuotai matuojamas PM ir TM.

Siūlomas metodas vykdomas pagal 2.3 pav. parodytą laikinę diagramą:

1. P_{PM1} ir P_{TM1} synchronizuotas vartojamų galių nuskaitymas, kai apkrova P_S yra prijungiama prieš TM (jungiklio padėtis $SW=1$).
2. P_{PM2} ir P_{TM2} synchronizuotas vartojamų galių nuskaitymas, kai apkrova P_S yra prijungiama lygiagrečiai apkrovai P_L (jungiklio padėtis $SW=2$).
3. P_{PM3} ir P_{TM3} synchronizuotas vartojamų galių nuskaitymas, kai apkrova P_S yra atjungta (jungiklio padėtis $SW=3$).
4. TM aktyviosios galios multiplikatyvinio pataisos koeficiento įvertinimas.



2.3 pav. Pataisos koeficiento nustatymo procedūros laikinė diagrama

Aktyviosios elektros galios balansas kiekvienai jungiklio SW pozicijai gali būti išreiškiamas taip:

$$\begin{cases} P_{PM1} = P_{N1} + P_S + c_p \cdot P_{TM1}, \\ P_{PM2} = P_{N2} + c_p \cdot P_{TM2}, \\ P_{PM3} = P_{N3} + c_p \cdot P_{TM3}; \end{cases} \quad (3)$$

kai

$$P_{N(j)} = P_{\Sigma load(j)} + P_{loss(j)}, j = \overline{1,3}, \quad (4)$$

čia $P_{\Sigma load(j)}$ yra visų tinklo apkrovų suvartojamos aktyviosios galios, išskyrus P_L ir P_S , suma, $P_{loss(j)}$ – aktyviosios galios nuostoliai elektros tinkle, $P_{PM(j)}$ – PM išmatuojama galia, jungikliui SW esant j -oje pozicijoje, o j – jungiklio SW pozicija.

Elektrinės galios nuostoliai žemosios įtampos elektros skirstymo tinkle yra proporcingi apkrovai, perduodamai elektros galiai. Todėl, remiantis 2.3 pav. diagrama, galima užrašyti:

$$\begin{aligned} P_{loss(1)} &= n \cdot (P_S + c_p \cdot P_{TM1}) + P_{\Sigma loss(1)}, \\ P_{loss(2)} &= n \cdot (c_p \cdot P_{TM2}) + P_{\Sigma loss(2)}, \\ P_{loss(3)} &= n \cdot (c_p \cdot P_{TM3}) + P_{\Sigma loss(3)}, \end{aligned} \quad (5)$$

čia n yra proporcingumo koeficientas tarp galios nuostolių žemosios įtampos elektros skirstymo tinkle tarp PM ir TM ir galios, kuri išmatuojama TM bei P_S , o $P_{\Sigma loss(j)}$ yra nuostoliai žemosios įtampos elektros skirstymo tinkle tarp PM ir TM, atsirandantys dėl visų kitų tinklo apkrovų vartojamų galių, kurie nekinta pataisos koeficiento nustatymo metu, ir pažymi, kad jie nepriklauso nuo P_S ir P_{TM} .

Šis metodas remiasi prielaida, jog matavimų, atliekamų pagal 2.3 pav. pavaizduotą komutavimo procedūrą metu, visos žemosios įtampos elektros skirstymo tinklo tarp PM ir TM esančios apkrovos yra pastovios, dėl to galios nuostoliai atsirandantys dėl šių apkrovų irgi yra pastovūs:

$$P_{\Sigma load(1)} = P_{\Sigma load(2)} = P_{\Sigma load(3)} = P_{\Sigma load}; \quad (6)$$

$$P_{\Sigma loss(1)} = P_{\Sigma loss(2)} = P_{\Sigma loss(3)} = P_{\Sigma loss}. \quad (7)$$

Kai SW yra 1-oje arba 3-oje pozicijoje, P_S nedaro įtakos TM rodmenims. Todėl, jei P_L yra konstanta, galima daryti prielaidą, kad:

$$P_{TM1} \approx P_{TM3}. \quad (8)$$

Padalinant (3) formulėje nurodytą 1-ąją lygtį iš 3-osios ir pertvarkant (4), (6), (7) bei (8) formules, galima išvesti lygtį:

$$P_S \approx P_{AM1} - P_{AM3}. \quad (9)$$

Ištačius (8)–(11) bei (13) į (7), galima išreikšti pataisos koeficiento reikšmę:

$$C_p = \frac{P_{PM1} - P_{PM3}}{P_{TM2} - P_{TM1}} + C_E, \quad (10)$$

čia C_E yra korekcijos koeficientas, skirtas įvertinti paklaidas, atsirandančias dėl prielaidų, padarytų išvedant (10) formulę. Koeficientas C_E yra priklausomas nuo žemosios įtampos elektros skirstymo tinklo dalies tarp TM ir PM charakteristikų. Konkrečioje PM ir TM instaliacijos vietoje C_E yra pastovus ir apibūdina sistemingąją paklaidos dedamąją. Norint įvertinti galimą C_E sklaidą skirtinguose elektros tinkluose, koeficientas bus laikomas atsitiktiniu dydžiu. Jo verčių priklausomybė nuo tipinių žemosios įtampos elektros skirstymo tinklo charakteristikų yra nagrinėta [97].

Apskaičiavus paeiliui išmatuotų P_{PM1} , P_{PM3} , P_{TM1} bei P_{TM2} imčių vidurkį, (10) formulę galima perrašyti taip:

$$C_p = \frac{\overline{P_{PM1}} - \overline{P_{PM3}}}{\overline{P_{TM2}} - \overline{P_{TM1}}} + C_E. \quad (11)$$

Kadangi TM yra įrengtas stacionariai, korekcijos koeficientas C_E yra pastovus (tinklo charakteristikos yra pastovios). Pastovaus dydžio vidurkis yra lygus šio dydžio vertei, t. y. $\overline{C_E} \equiv C_E$.

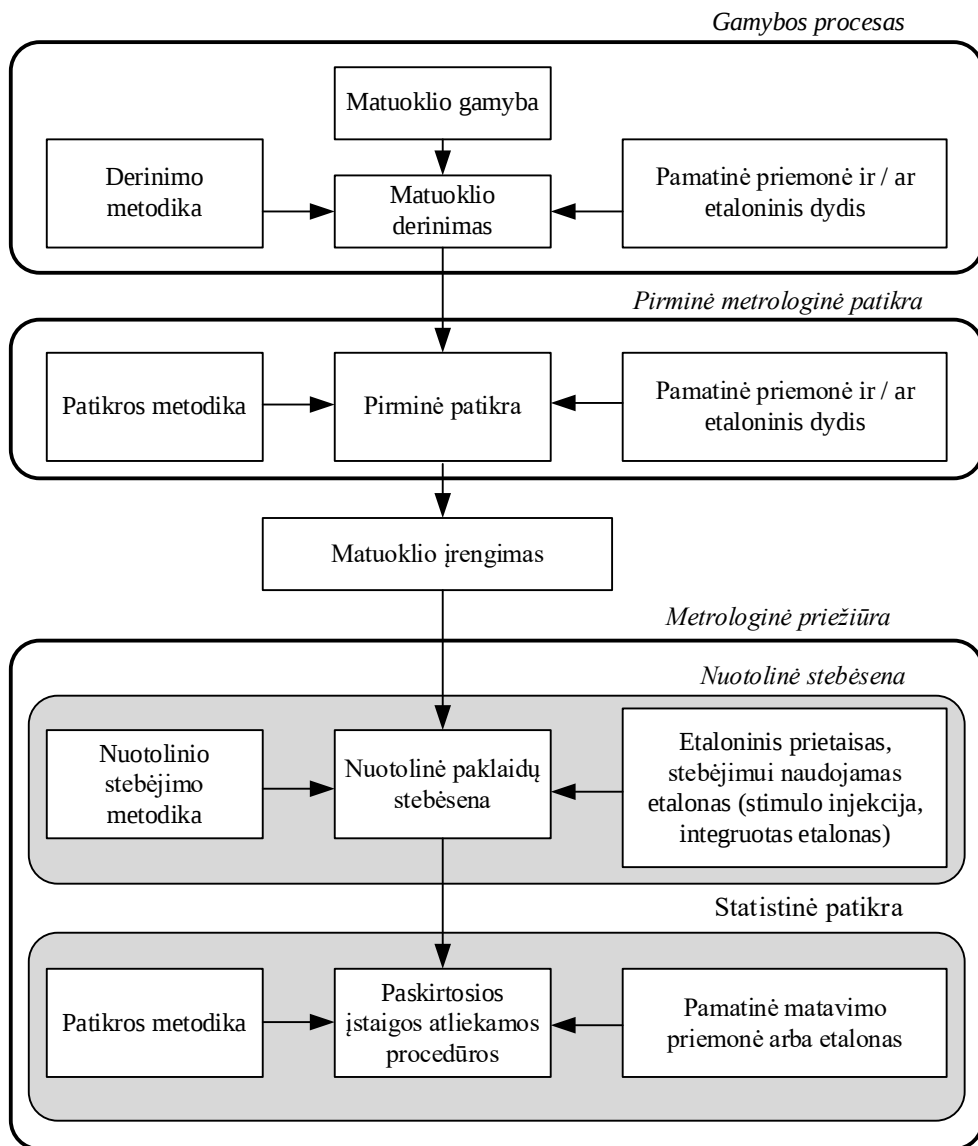
2.2 Nuotolinių metodų taikymas elektros apskaitos priemonių metrologinei priežiūrai

Nuotolinių priežiūros procedūrų įvedimas tampa vis labiau prieinamas, kadangi vis daugiau komunalinių paslaugų skaitiklių (vandens, elektros bei dujų) tampa išmaniaisiais bei yra prijungiami prie duomenų komunikacijos infrastruktūrų (pažangios matavimo infrastruktūros). Europos Sąjungoje valstybės narės yra priėmusios nuostatą, kuria bent 80 % elektros energijos matuoklių turi būti pakeičiami išmaniaisiais iki 2020 metų [21]. Tačiau, mūsų žiniomis, nuotolinė metrologinė patikra, paklaidų stebėseną ar net korekcijos metodai tebėra pradiniam tyrimų etape. Kai kurie metodai buvo patentuoti [28], bet nė vienas iš jų nebuvo patvirtintas teisinės metrologijos institucijų. Nuotolinio matuoklių stebėjimo metodai gali būti naudingi, norint matuoklio būklę įvertinti dažniau. Taip pat matuoklių paklaidų stebėseną gali būti vykdoma, to pageidaujant elektros energijos vartotojui arba elektros energijos tiekėjo įtarimų pagrindu. Ypač svarbūs yra tie naujoviški metodai, kurių įgyvendinimui reikalingi tik minimalūs techniniai esamų prietaisų bei infrastruktūros pakeitimai, kurie leistų neinvestuojant didelių lėšų įdiegti naujas funkcijas esamoje techninėje infrastruktūroje. Kita vertus, moksliniai nuotolinio stebėjimo efektyvumo įrodymai gali paskatinti gamintojus įgyvendinti, o matuoklių vartotojus reikalauti platesnio šių metodų diegimo. Pirmiausia, kaip naujoviškos nuotolinės paklaidų stebėsenos arba kitų nuotolinių priežiūros metodų testavimo terpė gali būti panaudojamos tos elektros energijos matavimų sritys, kurios nėra reguliuojamos teisinės metrologinės sistemos. Jei paaiškėtų, kad nuotoline paklaidų stebėseną galima

pasitikėti, būtų galima pradėti diskusiją dėl šių metodų taikymo visose elektros matavimų srityse.

2.2.1 Taikymas teisinės metrologijos srityje

Matuoklio gamyba apima ir jo individualias derinimo procedūras, atliekamas siekiant minimizuoti sistemingas paklaidas, sukeltas komponentų parametrų gamybinės sklaidos (2.4 pav.). Elektroniniuose išmaniuosiuose matuokliuose pataisos koeficientai yra laikomi energetiškai nepriklausomoje atmintyje, apsaugotoje nuo modifikavimo. Europos Sąjungoje pirminė patikra atliekama arba paties gamintojo, arba paskirtos įstaigos. Sumontavus EEM pradedama nuotolinė paklaidų stebėseną. Pasibaigus matuoklio patikros intervalui, paskirtoji įstaiga atsitiktiniu būdu iš vienuose įrengtų matuoklių grupės išrenka matuoklius statistinei patikrai ir tikrina jų atitiktį standartuose aprašytiems reikalavimams. Priklausomai nuo pasirinktos matuoklių grupės patikros (priklauso nuo nacionalinių teisės aktų) rezultatų, priimamas sprendimas dėl visos matuoklių grupės tinkamumo darbui bei dėl eksploatacijos intervalo pratęsimo. Taigi iš esmės, kol patikros periodas nepasibaigia, EEM metrologinė būseną nėra vertinama, išskyrus tuos atvejus, kai tikrinama reaguojant į elektros energijos vartotojų skundus. Ši spraga gali būti užpildoma eksploatacijos metu vykdant nenutrūkstamą arba dalinai nenutrūkstamą paklaidų stebėseną.



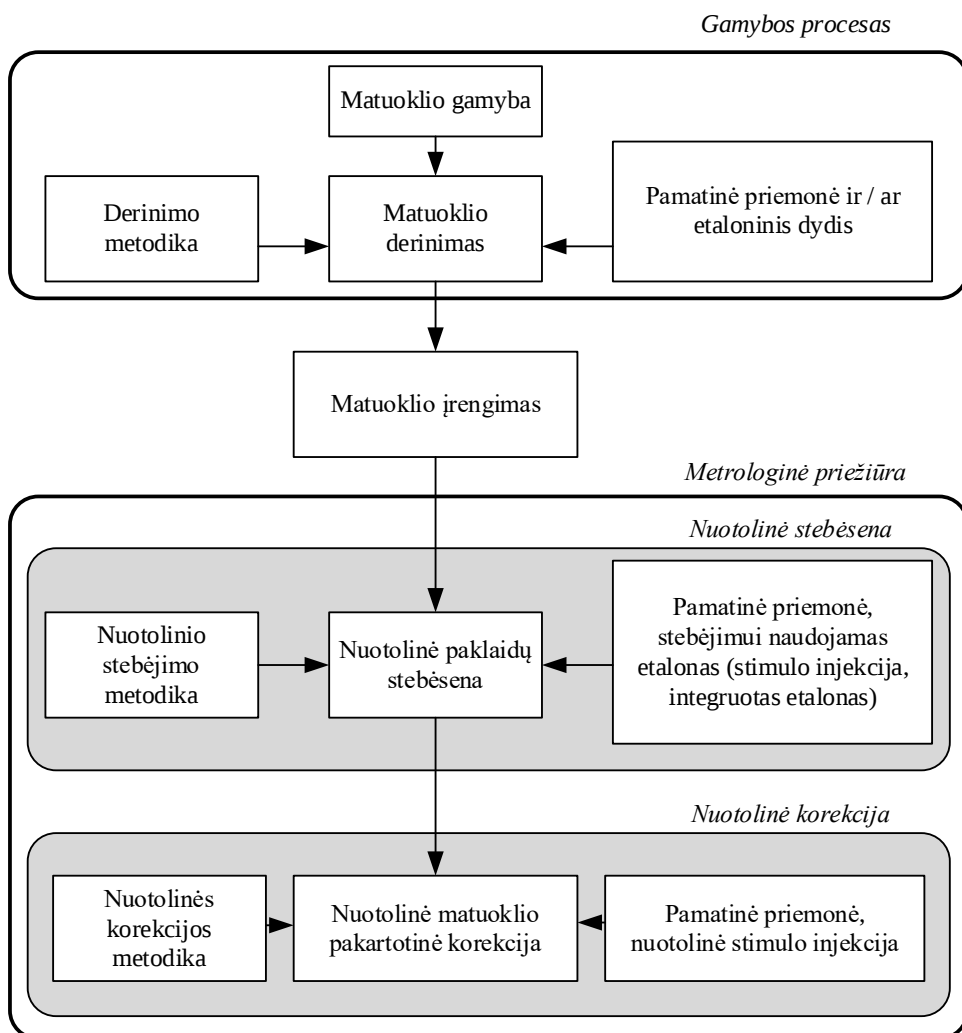
2.4 pav. Elektros skaitiklių metrologinės priežiūros schema teisinės metrologijos srityje

Nuolatinė EEM paklaidų stebėsena sudaro prielaidas užtikrinti pagerėjusią elektros energijos vartotojų ir tiekėjų ekonominę apsaugą, kadangi:

- 1) padidėja tikimybė aptikti matuoklius, kurių paklaidos viršija maksimalią leistiną paklaidą;
- 2) atsiranda galimybė daryti įtaką atsitiktiniam skaitiklių pasirinkimui atliekant metrologinę statistinę patikrą.

2.2.2 Taikymas pramoninės metrologijos srityje

Pramoninės metrologijos srityje naudojamiems elektros energijos matuokliams pirminė metrologinė patikra prieš prasidedant matuoklio eksploatacijai neprivaloma. Tačiau kalibravimo ar patikros procedūra gali būti atliekama matuoklio savininko sprendimu. Matuoklio darbo metu paklaidų stebėsena šiuo atveju gali būti panaudojama platesniu mastu. Tiksliau, nustatytas matuoklio pataisos koeficientas gali būti tiesiogiai taikomas TM rodmenims koreguoti (2.5 pav.). Korekcijos procedūra gali būti atliekama matuoklyje (į ilgalaikės atminties laikmeną įkeliant naujas pataisos koeficiento vertes) arba koreguojant jau sukaupčius rezultatus duomenų bazėse.



2.5 pav. Elektros skaitiklių metrologinės priežiūros schema pramoninės metrologijos srityje

2.3 Metodo verifikavimo metodika

Nuotolinio TM paklaidų stebėsenai bei multiplikatyviniam aktyviosios galios pataisos koeficientui įvertinti yra pasiūlytas metodas, paremtas sinchronizuotu aktyviosios galios matavimu pamatinės ir tikrinamosios priemonės prijungimo taškuose. Iškeliama hipotezė, kad pasiūlytuoju metodu galima užtikrinti TM aktyviosios galios pataisos koeficiento C_p nustatymo neapibrėžtį, kuri yra sąlygota pamatinės priemonės, aktyviosios galios vartojimo skirstomajame elektros tinkle charakteristikų bei stebėsenos intervalo trukmės.

Hipotezę siekiama patikrinti ir metodo charakteristikas nustatyti, naudojant matematinį modeliavimą ir eksperimentinius tyrimus.

Siūlomo nuotolinės aktyviosios galios matuoklių paklaidų stebėsenos metodo verifikavimui atlikti reikia nustatyti EMM pataisos koeficiento nustatymo paklaidos sistemingą ir atsitiktinę dedamąsias. Tuo tikslu bus pasitelkiami tokie tyrimo metodai:

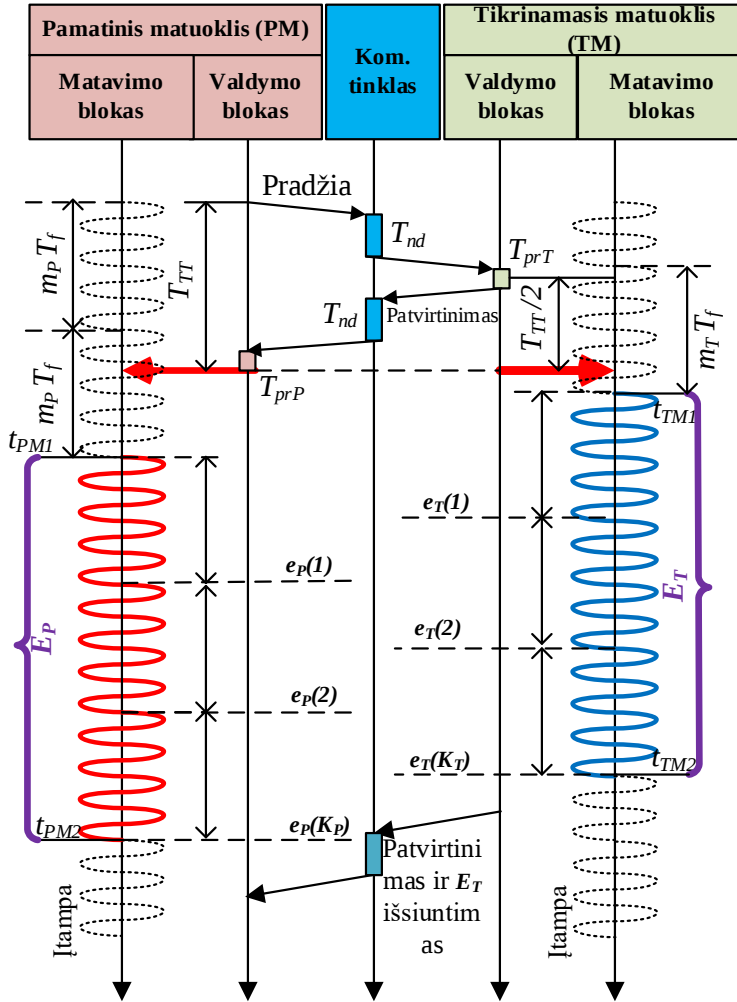
1. Siekiant apibūdinti TM multiplikatyvinio pataisos koeficiento įverčio paklaidos sistemingą dedamąją, metodas bus modeliuojamas panaudojant skirstomojo tinklo modelius ir apkrovų modelius „Matlab“ terpėje. Yra tikslinga nustatyti pataisos koeficiento sistemingųjų paklaidų diapazoną, atitinkantį skirstomojo elektros tinklo ir apkrovų tipinius parametrus, tokius kaip nuostoliai skirstomosiose linijose, vartojamos maksimalios galios, apkrovų pobūdis, įtampų svyravimai, galios faktorius.
2. Dėl didelės skirstomojo elektros tinklo konfigūracijų ir apkrovų įvairovės yra įprasta naujų metodų verifikavimą atlikti panaudojant sintezuotus duomenis, generuojant jų aibes modeliavimo eksperimentams atlikti ir statistiniams tiriamų parametrų įverčiams nustatyti. Atsitiktinei pataisos koeficiento nustatymo paklaidos dedamajai įvertinti bus panaudoti sintezuoti buitinių vartotojų galios suvartojimo profiliai bei eksperimentiniai galios matavimų duomenys.
3. Pataisos koeficiento įverčio sklaidos priklausomybę nuo matavimo intervalo trukmės tipinėse eksploataavimo sąlygose bus siekiama įvertinti surinkus eksperimentinius sinchronizuotus galios matavimus, naudojant tam tikslui sukurtą eksperimentinę sistemą. Elektros energetinių sistemų tyrimuose yra įprasta naujai iškeltas hipotezes tikrinti ar pasiūlytus metodus verifikuoti naudojant tipinius (testinius) tinklus. Tyrimui buvo pasirinkti du tipiniai EEM eksploatacijos scenarijai: privačiame ir daugiabučiame name. Eksperimentiniai tyrimai taip pat atlikti KTU FABLAB Kaunas EMC laboratorijoje bei KTU Elektronikos inžinerijos katedroje.
4. Panaudojant modeliavimo ir eksperimentinių tyrimų rezultatus ir analitinius modelius, pasiūlytasis metodas bus apibūdinamas pataisos koeficiento nustatymo neapibrėžtimi.

2.4 Reikalavimai galios matavimų sinchronizavimui

Vis gerėjanti sinergija tarp modernių duomenų perdavimo technologijų ir energetikos sektoriaus atveria daug naujų galimybių geresniam elektrinės galios vartojimo profiliavimui, žemosios įtampos elektros skirstymo tinklo būklės stebėjimui ir sąlygų diagnostikai, komercinių matuoklių duomenų rinkimui bei daug kitų sričių. Įprastai išmaniųjų matuoklių elektrinės galios vartojimo parodymai surenkami kas valandą. Šis duomenų atnaujinimo dažnis nėra tinkamas paklaidų stebėsenai realiuoju laiku. Toks duomenų atnaujinimo laikas yra naudojamas tik tais atvejais, kai jis padeda apdoroti surinktus duomenis, vykdyti jų analizę arba sudaryti duomenų ataskaitas. Duomenų perdavimo kanalai tarp matuoklių ne tik leidžia gautus matavimo rodmenis perduoti nuotoliniu būdu į duomenų bazę tolesnei analizei (sąskaitų sudarymui), tačiau gali būti naudojami ir įvairių paskirstytų elektros tinklo parametrų matavimui sinchronizuoti. Remiantis laiku pažymėtais ir / ar sinchronizuotais matavimų duomenimis, galimi įvairūs taikymo būdai [51–57].

3.1 pav. pateikiama eigos diagrama paaiškina veiksmų seką į aktyviosios galios matavimo sinchronizacijos procesą įvedant siūlomą algoritmą. Norint duoti komandą TM pradėti matavimą, PM siunčia komandą „Pradėti“ (3.1 pav.). Kai iš TM gaunamas „Patvirtinimo“ pranešimas, PM pasiruošęs prašyti jam priskirto matavimo bloko perduoti aktyviosios galios rodmenis. Išsiuntęs atsakomąjį „Patvirtinimo“ pranešimą TM pavėlina matavimo rodmenų prašymo pradžią puse tarp PM ir TM perduodamų paketų vėlavimo (PPV) vertės $T_{TT}/2$. Naudojant PPV T_{TT} kartu atsižvelgiama ir į perduodamų duomenų dažnį, pakartotinai paketus perduodančių mazgų sukeltą vėlavimą (T_{nd}) bei aparatinės ir programinės įrangos vykdomą apdorojimą pamatiniame matuoklyje T_{prP} ir nuotoliniame matuoklyje T_{prT} . PM gali apskaičiuoti TM pasiekiantį dabartinį perdavimo vėlavimą naudodamas vidinį kvarcinį stabilizuotą etaloninį laikrodį.

Tačiau vėlavimas gali svyruoti priklausomai nuo tarp PM ir TM esančios terpės būklės. Vėlavimo nestabilumas (angl. *jitter*) yra apibūdinamas tikimybine pasiskirstymo funkcija arba jos statistiniais parametrais, pvz., standartiniu nuokrypiu. Sinchronizacijos tikslumą įtakoja ne perdavimo vėlavimo dydis, o jo nestabilumas (drebjimas). Jei apskaičiuotas PPV išlieka pastovus (t. y. drebjimo nėra), TM gali atidėti matavimo pradžią per $T_{TT}/2$ ir tiksliai prognozuoti momentą, kada PM pradės aktyviosios galios matavimą. TM pabaigus elektros aktyviosios galios matavimus, rezultatai siunčiami į PM, kartu patvirtinant ir įvykusį perdavimą.



3.1 pav. Galios matavimų, vykdomų PM-iu bei TM-iu, sinchronizavimo algoritmas

3.1 pav. pateikiamo aktyviosios galios matavimų sinchronizacijos algoritmo tikslas – surinkti aktyviosios galios suvartojimo, matuojamo PM ir TM atitinkamai laiko intervalais $t_{TM1} \div t_{TM2}$ bei $t_{PM1} \div t_{PM2}$, rodmenis. Matavimo intervalų nuokrypis gali būti išreiškiamas matavimo pradžios momento pasislinkimu:

$$\Delta t_{Pradžia} = |t_{TM1} - t_{PM1}| \quad (12)$$

ir skirtumu tarp aktyviosios galios matavimo intervalų trukmės:

$$\Delta t_{Meas} = |(t_{TM2} - t_{TM1}) - (t_{PM2} - t_{PM1})|. \quad (13)$$

Dėl su nuliniu lygio kirtimu susijusio drebinimo t_{TM1} , t_{TM2} , t_{PM1} bei t_{PM2} yra atsitiktiniai dydžiai. Kadangi Δt_{Start} bei Δt_{Meas} nėra lygūs nuliui, gaunami tik nukrypę PM bei TM atliekamų aktyviosios galios matavimų rezultatų intervalai. PM

matuojami aktyviosios galios suvartojimo rodmenys atitinka aktyviosios galios $p_{TM}(t_{TM})$ suvartojimo rodmenis per laiko intervalą $t_{TM1} \div t_{TM2}$:

$$E_T = \int_{t_{TM1}}^{t_{TM2}} p_{TM}(t) dt. \quad (14)$$

Kadangi PM bei TM matavimo procesai nėra tiksliai sinchronizuoti, aktyviosios galios rodmenys, gaunami PM, yra:

$$E_P = \int_{t_{PM1}}^{t_{PM2}} p_{PM}(t) dt. \quad (15)$$

PM aktyviosios galios rodmenys, esant tobuloms sinchronizacijos sąlygoms, yra:

$$E_P^* = \int_{t_{TM1}}^{t_{TM2}} p_{PM}(t) dt. \quad (16)$$

Kadangi aktyviosios galios (arba jo vidurkio) rodmenys moderniose aktyviosios galios matavimo elektroninėse sistemose įprastai yra gaunami išmatavus sveiką pilnų fundamentinių periodų skaičių, tai PM bei TM atliekamų matavimų trukmės yra:

$$t_{TMMeas} = t_{TM2} - t_{TM1} = K_T \cdot (m_T \cdot T_f), \quad (17)$$

$$t_{PMMeas} = t_{PM2} - t_{PM1} = K_P \cdot (m_P \cdot T_f), \quad (18)$$

čia m_T ir m_A yra fundamentinių periodų skaičius, reikalingas vienam aktyviosios galios rodmeniui gauti, T_f – fundamentalusis periodas, o K_T ir K_A – sveikosios konstantos, parenkamos taip, kad būtų užtikrintas galios matavimo intervalų PM ir TM sutapimas, t. y. $t_{TMMeas} = t_{PMMeas}$. Todėl (14) bei (15) lygtys gali būti pertvarkomos taip:

$$E_T = \sum_{i=1}^{K_T} e_T(i), \quad (19)$$

$$E_A = \sum_{j=1}^{K_A} e_A(j), \quad (20)$$

kai

$$e_T(i) = \int_{t_{TM1} + (i-1) \cdot m_T \cdot T_f}^{t_{TM1} + i \cdot m_T \cdot T_f} p_{TM}(t) dt, \quad (21)$$

$$e_P(j) = \int_{t_{PM1} + (j-1) \cdot m_P \cdot T_f}^{t_{PM1} + j \cdot m_P \cdot T_f} p_{PM}(t) dt. \quad (22)$$

Kiekvienas aktyviosios galios rodmuo gali būti modeliuojamas kaip pastovių galių, atitinkamai E_{PM0} ir E_{PM0}^* , bei atsitiktinių trumpalaikių svyravimų įverčių, atitinkamai $E_{PMfluct}$ ir $E_{PMfluct}^*$, suma:

$$E_P = E_{P0} + E_{Pfluct}, \quad (23)$$

$$E_P^* = E_{P0}^* + E_{Pfluct}^*. \quad (24)$$

Kadangi matavimo intervalas $t_{PM1} \div t_{PM2}$ yra gana trumpas (1–2 sekundės), tai daroma prielaida, kad tuo metu aktyviosios galios suvartojimas yra pastovus (vartotojai neperjungia apkrovų arba nepakeičia jų darbo režimo):

$$E_{P0} = E_{P0}^*. \quad (25)$$

Todėl sinchronizacijos paklaidų nulemtas skirtumas tarp TM matuojamų aktyviosios galios rodmenų iš esmės kyla dėl trumpalaikių svyravimų komponento:

$$\Delta E_P = E_P - E_P^* = E_{Pfluct} - E_{Pfluct}^*. \quad (26)$$

Duomenų sinchronizacijos technologijos gali būti skirstomos į kelias sritis: technologijos, naudojančios globalias navigacijos sistemas (GPS, GALILEO ir kt.) bei paremtos ryšio kanalų protokolais [58]. Kadangi matavimo prietaisai, kaip ir išmanieji matuokliai, paprastai yra įrengiami vietose, kuriose sąlygos priimti GNSS palydovinių signalą nėra palankios, šiame tyrime detaliau nagrinėjami sinchronizavimo sprendimai, kurie realizuojami duomenų paketų perdavimu ryšio tinklu pagrindu. Iš aktyviosios galios matavimų metodų, grindžiamų aktyviosios galios akumuliacija per fundamentalius periodus, akivaizdu, jog duomenų saitas privalo užtikrinti, kad sinchronizacija bus atliekama vieno pagrindinio fundamentalaus periodo tikslumu. Toliau aptariama tokių prie Pažangios matavimų infrastruktūros (PMI) prisidedančių duomenų perdavimo technologijų, kaip tradiciniai ryšio elektros tinklų PLC (angl. *Power Line Carrier*), vis labiau plintantis siaurajuostis daiktų internetas (NB-IoT), „LoRa WAN“ bei WiFi, tinkamumas užtikrinti, kad sinchronizacija bus atliekama vieno fundamentalaus periodo tikslumu.

Įtampos nulio lygio kirtimas (NLK) gali būti panaudojamas galios matavimų sinchronizavimui nutolusiuose elektros tinklo taškuose. Tačiau NLK neturi jokios laiko žymos, o NLK aptikimas tame pačiame tinkle prijungtais matuokliais nesuteikia jiems informacijos, ar aptiktas tas pats NLK. Kita vertus, NLK gali būti geras pasirinkimas norint kai kuriuos matavimo žingsnius sinchronizuoti vieno pagrindinio fundamentalaus periodo tikslumu. Jei visuotinis sinchronizacijos momentas yra perduodamas tarp PM ir TM, tuomet matavimą pradedančiu įvykiu gali būti pirmasis artimiausias įtampos NLK.

NLK momentas gali svyruoti dėl įvairių priežasčių: apkrovų dinamikos, triukšmo, įtampos bei srovės disbalansų, signalo išsikraipymų [59]. [61] šaltinyje pristatomas tyrimas parodė 20 μs NLK svyravimą bei kartais kylančius impulsyvius svyravimus, siekiančius 200 μs. [62] šaltinyje autoriai praneša, kad su 99,9 %

tikimybė pasiekiamas $\pm 60 \mu\text{s}$ NLK drebėjimas. NLK momento vėlavimas tarp paskirstytų vietų gali papildomai prisidėti prie aktyviosios galios rodmenų nuskaitymo momentų nuokrypių. Tačiau vėlavimas tarp NLK momentų žemosios įtampos elektros skirstymo tinkle nėra reikšmingas, kadangi jo dydžiai – mikrosekundiniai. [63] šaltinio autoriai, remdamiesi bangos sklidimo greičiu varyje, apskaičiavo, kad 2 km žemosios įtampos elektros skirstymo tinkle nuotolis gali priversti NLK vėluoti 11 μs .

Ryšio elektros linijomis (angl. *power line carrier* – PLC) technologija (toliau tekste PLC) šiuo metu artėja prie savo brandos, o jos pirminė paskirtis yra automatinis matuoklių rodmenų nuskaitymas (AMRN) pažangioje matavimo infrastruktūroje (PMI) (angl. *advanced measurement infrastructure* – AMI). Neseniai atliktos PLC techninio lygio apžvalgos santrauka pateikiama [64]. Europoje pagal populiarumą dominuoja du pagrindiniai PLC standartai – PRIME ir G3. Naudojant PLC sistemas yra galimi du matavimų sinchronizavimo realizavimo būdai:

- 1) matuoklių laikrodžių sinchronizavimas panaudojant PLC paketus;
- 2) pavienių sinchronizuotų matavimų inicijavimas apskaičiavus paketų perdavimo vėlavimo tam tikrame kanale, esančiame tarp dviejų matavimo prietaisų, vertę.

Pagal [65] šaltinyje pateikiamus rezultatus PLC sistemose pasiekiamas sinchronizavimo tikslumas yra nuo $\pm 10 \mu\text{s}$ iki $\pm 130 \mu\text{s}$, priklausomai nuo tarpinio paketų pakartojimo mazgų tarp dviejų matavimų atliekančių matuoklių skaičiaus. [66] šaltinyje nustatytas $\pm 10 \text{ ms}$ virpėjimas, naudojant plėstinį spektrą bei ortogonalus dažnio tankinimu pagrįstą PLC du taškus jungiančioje ryšio sistemoje.

Prie ryšio tinklo prijungtų mazgų laikrodžių sinchronizavimo procedūros, atliekamos naudojant sinchronizacijos pranešimus, yra aprašomos IEEE 1588-2008 (TLP – Tikslaus laiko protokolo (angl. PTP – *Precision Time Protocol*)) standarte [67]. TLP pirmiausia buvo skirtas Ethernet'o tinklams bei submikrosekundinio laiko tikslumui. Jo pritaikymas laikrodžių sinchronizacijai prietaisuose, prijungtuose prie PLC sistemos, analizuojamas [68] šaltinyje. Turint omenyje anksčiau aptartus aktyviosios galios matavimo metodus, daroma prielaida, jog sinchronizacijos tikslumui keliami reikalavimai 1 kategorijos (laiko tikslumas $< \pm 100 \text{ ms}$) bei 2 kategorijos (laiko tikslumas $< \pm 1 \text{ ms}$) prietaisams pagal IEEE 1588 [69] arba D klasės (10 ms) prietaisams pagal IEC 61850-5 turėtų būti pakankami, norint nuotolinę matuoklio klaidų stebėseną realizuoti pagal darbe nagrinėjamą metodą.

[67] šaltinyje nagrinėjamas paprastas tinklo laiko protokolo (angl. *Simple Network Time Protocol* – SNTP) naudojimas prie žemosios įtampos elektros skirstomojo tinklo prijungtų prietaisų laiko sinchronizacijai. Naudojant žemosios įtampos elektros skirstomojo tinklo laiko sinchronizacijos metodus, aprašytus [60], sinchronizacijos tikslumo nepastovumas (angl. *jitter*) apibūdinamas standartiniu nuokrypiu $50 \div 70 \text{ ms}$ naudojant žemosios įtampos elektros skirstomojo tinklo – WB-PLC (angl. *Wide Band – Power Line Carrier*) duomenų perdavimo kanalus,

realizuojamus $2 \div 12$ MHz dažnių juostoje. Nustatytas sinchronizacijos tikslumas žemosios įtampos elektros skirstomuosiuose tinkluose lygus 150 ms. Gana didelis virpėjimas, kurio poveikis siekia net 500 ms, buvo paaiškintas integruotų sistemų, apimančių prie žemosios įtampos elektros skirstomojo tinklo prijungtus matuoklius, realizavimo ypatybėmis bei WB-PLC ryšio standarte taikomo TDMA (angl. *Time Division Multiple Access*) laikinio sutankinimo būdo specifika. Naudojant siaurajuosčio PLC NB-PLC ($3 \div 148,5$ kHz Europoje) sistemas su BPSK/QPSK tipo moduliacija bei „Modbus RTU“ pranešimus, nustatyta, kad žemosios įtampos elektros skirstomojo tinklo paketų vėlinimo virpėjimas (apibrėžiamas kaip maksimalus perdavimo trukmės svyravimas) siekė 16 ms [70].

Svarstomas belaidžių LPWAN technologijų panaudojimas išmaniuosiuose matuokliuose. [71] šaltinyje apibendrinami techniniai skirtumai tarp pačių populiariausių „LoRa WAN“, „Sigfox“ bei „NB-IoT“ (*Narrow Band IoT*) technologijų. Aptariamas šių trijų technologijų tinkamumas elektros energijos matavimų srityje. Autorių pabrėžiama, kad šiuo atveju „LoRa WAN“ ir ypač siaurajuosčių DI tinkama naudoti matavimų sinchronizacijai, tuo tarpu „SigFox“ technologija dėl savo didelio vėlavimo yra pritaikoma sunkiau. [72] šaltinyje pateikiamas išsamus „LoRa“ bei siaurajuosčio DI technologijų palyginimas. Iš pradžių LPWAN tinklai buvo kuriami siekiant didelio komunikacijos atstumo, mažų elektros sąnaudų bei aukšto pritaikomumo lygio, kas yra vieni pagrindinių daiktų interneto reikalavimai. Pramoniniam daiktų internetui (PDI) taip pat reikalinga ir tinklo mazgų sinchronizacija. „R-Sync“ algoritmas, pasiūlytas [73] šaltinio autorių, užtikrina, kad belaidžių mazgų sinchronizacijos tikslumas būtų geresnis nei 400 μ s. Šis sinchronizacijos tikslumo lygis būtų pakankamas suvartojamos aktyviosios galios matavimo sinchronizacijai mūsų apsvaistomo nuotolinės paklaidų stebėsenos taikymo atveju. [74] šaltinyje buvo tiriama belaidžių „LoRa WAN“ technologijų tinkamumas taikyti paskirstytuose sinchronizuotų matavimo sistemose. Tyrimo autoriai išsiaiškino, kad įmanoma suplanuoti kadrų perdavimą (laiko žymėjimą) su mažesniu nei 3 μ s standartiniu nuokrypiu. Dėl komunikacinės veiklos ciklo apribojimų pagal vietinius reglamentus vėlavimai ir minimalūs duomenų atnaujinimo laikai yra susiję su „LoRa WAN“ tinkle esančių mazgų skaičiumi. Pavyzdžiui, esant 1000 mazgų (realus išmaniųjų matuoklių kiekis didelių pastatų arba mažesnių rajonų žemosios įtampos elektros skirstomuosiuose tinkluose) duomenų atnaujinimas vykdomas mažiausiai kas 20 s [75]. Aptariamam nuotolinės elektros skaitiklių kontrolės taikymo būdai atnaujinimo laiko ilgis ir vėlavimas nėra itin svarbūs, kadangi jie tik pailgintų aktyvios galios rodmenų matavimo proceso trukmę ir nepablogintų metodo tikslumo lygio (priklausomai nuo sinchronizacijos tikslumo). Tačiau metodo komunikacinių reikalavimų nustatymas „LoRa WAN“ protokole dar nebuvo aptartas detalai.

Siaurajuostis DI yra LTE besiremianti technologija. Pasaulinis sertifikavimo forumas (PSF) per metus sertifikuoja daugiau nei 300 siaurajuosčio DI prietaisų, o tai

įrodo, kad telekomunikacijų pramonės įmonės išvelgia šios technologijos naudą ateičiai. Pavyzdžiui, įmonės „Huawei“ bei „Janz Ce“ išleido pirmuosius išmaniuosius elektrinės galios matuoklius, kuriuose įrengti „ublox“ moduliai, įgalinantys komunikaciją siaurajuosčiu DI [76]. Matavimo išmaniaisiais matuokliais sprendimų teikėjas „Kamstrup“ pasirašė sutartį su „Herrfors“ elektros įmone, pasižadėdami pristatyti 16000 nuotolinio matavimo elektrinės galios matuoklių, besinaudojančių siaurajuosčio DI technologija [76]. Siaurajuostis DI naudojasi esama LTE infrastruktūra, be to, ji palaiko platus įmonių spektras, pavyzdžiui, tokie tinklo operatoriai kaip „AT&T“, „Telefonica“, „China Unicom“, „China Mobile“, „Deutsche Telekom“, „Verizon“, „Telstra“, „Vodafone“ ir kiti [77]. Siaurajuostis DI yra naudojamas aplinkoje, kuri leidžia mažesnę nei 10 sekundžių vėlavimą [78], pavyzdžiui, duomenų perdavimo aukštynkrypte linija vėlavimas gali svyruoti nuo 1,6 iki 7,6 sekundžių prietaisui esant atitinkamai mobilaus plačiajuosčio tinklo pakraštyje arba už jo ribų, priklausomai nuo konkretaus įrengimo atvejo [79]. Taip pat simuliacija, atlikta naudojant tinklo simulatorių „ns-3“, parodo, jog išmaniųjų elektros galios matuoklių, įrengtų tokiose radijo ryšiui nepalankiose vietose kaip rūšiai arba už metalinių plokščių, atveju paketų perdavimas aukštynkrypte linija turi būti pakartojamas keletą kartų ir, aišku, tuomet vėlavimas didėja [80]. Be to, [81] šaltinio autoriai parodo, jog paketo dydis, palaikomų prietaisų skaičius, vėlavimas bei duomenų dažnis vienas nuo kito priklauso žymiai labiau bei skiriasi, todėl padidėjęs paketo dydis proporcingai padidina ir vėlavimą visiems tinkle esantiems prietaisams. Siaurajuostis DI yra skirtas naudoti tokiais atvejais, kai DI vėlavimą toleruoja, pavyzdžiui, AMRN paslaugų atveju [82].

Aktyviosios galios matuokliai, ypač tie, kurie skirti namų automatizacijai (išmaniesiems lizdams, subskaitikliams), gali turėti prieigą prie WiFi belaidžio ryšio. Ši plačiajuostė technologija taip pat yra laikoma labai perspektyvia išmaniųjų elektros tinklų srityje [83]. [84] šaltinyje tiriama prietaisų, sujungtų duomenų paketų sujungimo tinklais, naudojant tinklo laiko protokolą (TLP) (siektina sinchronizacija milisekundžių tikslumu) sinchronizacija. Naudojant ne realaus laiko (angl. *Non-real time*) „Linux OS“ kompiuterines sistemas, gaunami eksperimentiniai rezultatai rodo, kad laiko tikslumo protokolais grindžiami protokolai gali užtikrinti nuo 109 ns iki 3,25 μ s sinchronizacijos atsvarą bei nuo 360 ns iki 1,6 μ s drebinimą, priklausomai nuo komunikacinio tinklo apkrovos bei prietaiso centrinio procesoriaus [85]. Rodos, kad tokio pasiekiamo drebinimo lygio pakanka norint į žemosios įtampos elektros skirstomuosius tinklus įvesti sinchronizaciją, kurios tikslumas būtų ne mažesnis nei vienas fundamentalus periodas.

2.5 Skyriaus apibendrinimas

Antrajame skyriuje aprašytas nuotolinis aktyviosios galios matuoklių paklaidų stebėsenos metodas, grindžiamas TM aktyviosios galios rodmenų palyginimu su PM rodmenimis. TM aktyviosios galios rodmenys turi būti perduodami į PM naudojant

duomenų perdavimo kanalą. Šis metodas leidžia įvertinti nuotolinio įrenginio pataisos koeficientą, nepriklausomai nuo kitų nestebimų apkrovų, prijungtų prie to paties elektros tinklo. Įgyvendinant metodą yra daroma prielaida, kad visos tinklo apkrovos yra pastovios pataisos koeficiento nustatymo procedūrai reikalingų galios rodmenų surinkimo intervale.

Disertacijoje tiriamas kitų autorių netirtas naujas inovatyvus nuotolinės EEM paklaidų stebėsenos metodas. Siūlomas metodas paremtas sinchronizuotų aktyviosios galios matavimų rezultatų palyginimu tarp nutolusių vienas nuo PM ir TM. PM yra montuojamas elektros potinklio įvade, o TM – savo įprastinėje darbo vietoje. Tarp PM ir TM yra žemosios įtampos elektros skirstymo tinklas bei kitų vartotojų nežinomos apkrovos prijungtos tame pačiame tinkle ir kiti TM. Kiti autoriai savo siūlomuose metoduose naudoja didelės galios etalonines apkrovas (300 W ar 600 W) [24–26]. Šiame darbe siūloma naudoti mažos galios (~10 W) nebūtinai etaloninę rezistyvinę apkrovą. Perjungiamos apkrovos tikslumas nėra svarbus, kadangi ji neatlieka etaloninio prietaiso vaidmens, o yra skirta formuoti stimului, kurį sinchronizuotai matuoja PM ir TM. Kitų autorių siūlomuose metoduose naudojami vidiniai etaloniniai nuolatinės įtampos [24] arba kintamosios įtampos [25] generatoriai, kad pavyktų sugeneruoti tikslią maitinimo įtampą etaloninei apkrovai išmatuoti. Šiame darbe tokie generatoriai nėra naudojami, nes siūlomas metodas remiasi tuo, kad PM ir TM turi išmatuoti tą patį aktyviosios galios pokytį (stimulą). Skirtingai nuo kitų nuotolinės EEM paklaidų stebėsenos metodų, paremtų suminio pamatinio matuoklio naudojimu [29–31], darbe siūlomas metodas leidžia įvertinti kiekvieno TM paklaidą individualiai (nepriklausomai nuo kitų tinkle eksploatuojamų matuoklių ar neapskaitomo energijos vartojimo).

Pastebima, jog nuotolinio stebėjimo darbo metu metodų taikymas griežtai reguliuojamoje teisinės metrologijos srityje gali padėti geriau pasirinkti tikrinamuosius matuoklius bei jų atrankos momentą, kalbant apie statistinę homogeniškos grupės patikrą. Pramoninės metrologijos srityje, pavyzdžiui, subapskaitos sistemų atveju, nuotolinės paklaidų stebėsenos rezultatai gali būti panaudoti priimant sprendimą dėl matuoklio pakeitimo arba dėl matuoklio rodmenų korekcijos, sutinkant prietaiso savininkams.

Metodo verifikavimui numatyti tyrimai apima modeliavimą ir eksperimentinius tyrimus, kuriais bus siekiama nustatyti EEM multiplikatyvinio pataisos koeficiento nustatymo sistemingąją ir atsitiktinę paklaidas, taikant metodą tipiniuose žemos įtampos skirstomuosiuose tinkluose.

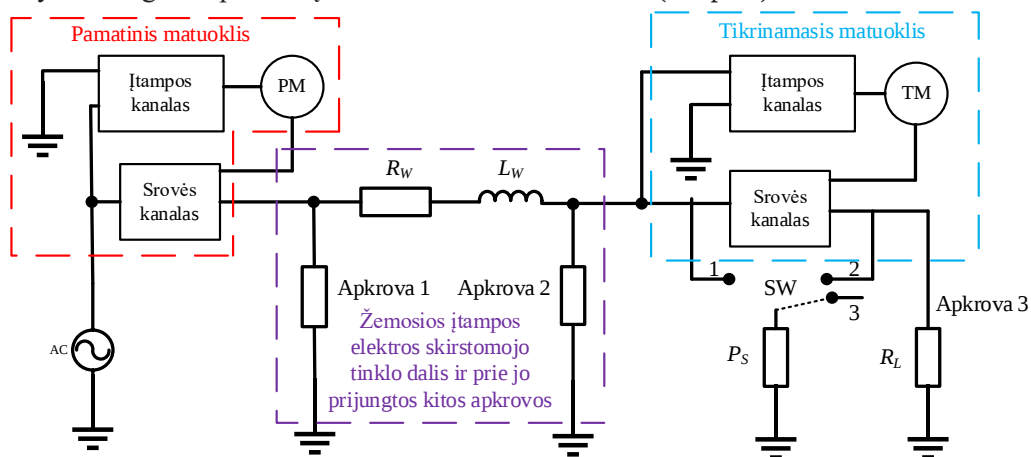
3 ELEKTROS ENERGIJOS MATUOKLIŲ NUOTOLINĖS STEBĖSENOS METODO PAKLAIDŲ TYRIMAS

3.1 Sistemosios metodo paklaidos tyrimas

Siekiant įvertinti sistemosios metodo paklaidos ribas ir skirtingų elektros tinklų apkrovų poveikį siūlomam nuotolinio elektrinės galios matuoklių paklaidos stebėsenos metodui, buvo naudojamas matematinis modeliavimo metodas. Šiame skyriuje siekiama ištirti visas įmanomas žemosios įtampos paskirstymo tinklo konfigūracijas ir rasti maksimalią metodo sistemosios paklaidą. Visų įmanomų elektros tinklo konfigūracijų įtakos sistemosios paklaidai eksperimentiškai ištirti neįmanoma dėl didžiulės tinkle esančių apkrovų bei elektros tinklo konfigūracijų įvairovės, dėl to tyrimą pasirinkta atlikti modeliavimo būdu.

3.1.1 Modelio sudarymas

Naudojantis MATLAB „PowerSim“ programa sukurtas sistemos nuotolinio aktyviosios galios paklaidų stebėsenos metodo modelis (3.1 pav.).



3.1 pav. Metodo verifikavimui modeliavimo būdu sudarytas modelis, apimantis pamatinį ir tikrinamąjį matuoklius bei skirstomąjį tinklą tarp matuoklių

Metodo modeliavimas atliktas, taikant vienos fazės žemosios įtampos elektros skirstymo tinklo modelį, sudarytą iš įprastai vidaus elektros instaliacijoje naudojamų kabelių su $2,5 \text{ mm}^2$ skersmens variniais laidininkais. Atstumas tarp PM ir TM modeliavimo metu yra fiksuotos vertės – 200 m. Apkrovos, žymimos kaip apkrova 1, apkrova 2 ir apkrova 3, yra modeliuojamos pagal apkrovų modelius, pateiktus 3.2 pav., netiesinės apkrovos (angl. *Nonlinear load*) modelis yra pateiktas 3.3 pav. [86, 87]. Koreguojant vidinius netiesinės apkrovos parametrus, buvo nustatyta maždaug 100 W jos aktyvioji galia. Didesnė aktyvioji netiesinės apkrovos galia buvo pasiekta sujungiant atitinkamą tokių apkrovų skaičių lygiagrečiai. 2 lent. pateikiami įvairūs

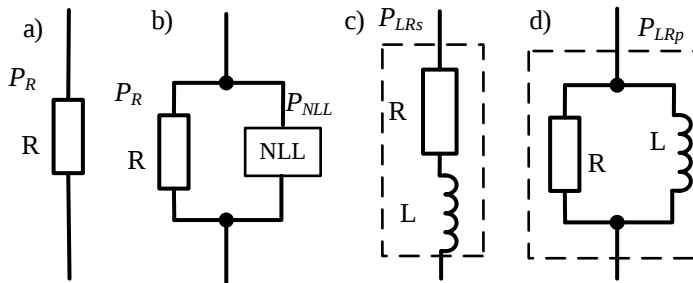
tinklo apkrovų tipų ir lygių deriniai. Siūlomas metodas buvo ištirtas manipuliuojant įvairių tipų apkrovomis tipinėse situacijose, pvz., buityje, biure, įskaitant kompiuterius, šildytuvus, apšvietimą ir įrenginius su elektriniais varikliais. P_{PM1} , P_{PM3} , P_{TM1} ir P_{TM2} vertės gaunamos modeliuojant tinklo modelius (3.1 pav.), o vėliau naudojamos apskaičiuojant pataisos koeficiento įvertį pagal (11) formulę. Norint patikrinti metodo gebą įvertinti aktyviosios galios pataisos koeficientą, P_{TM1} , P_{TM2} vertės buvo padalintos iš $C_p^* = 1,5$ prieš pakeičiant jas (11) formule. Ši sisteminė santykinė aktyviosios galios pataisos paklaida yra apibrėžiama kaip:

$$e_{sis}(c_p) = \frac{C_p - C_p^*}{C_p^*} \cdot 100 \% \quad (27)$$

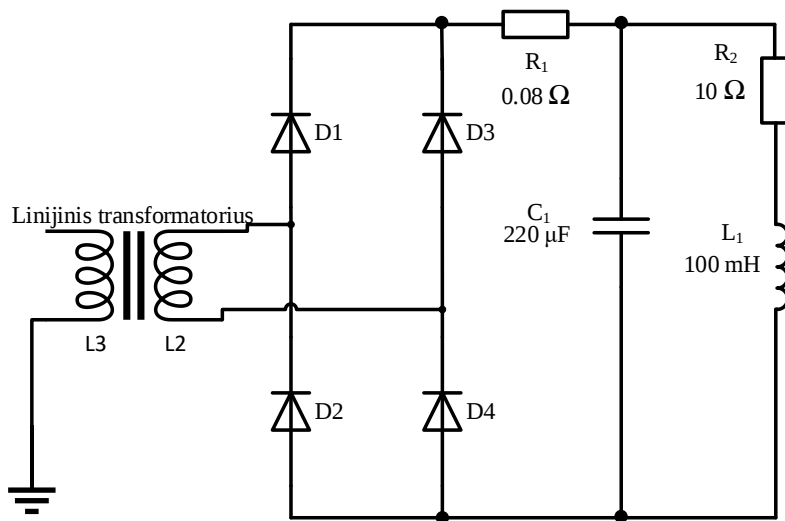
arba:

$$e_{sis}(c_p) = \frac{C_p - C_p^*}{C_p^*} \cdot 10^6 \text{ (dalys milijonų, (ppm))}, \quad (28)$$

čia C_p yra vertė, apskaičiuota pagal (11) formulę, C_p^* – tikroji pataisos koeficiento vertė. Įvairių apkrovos tipų įtaka $e_{sis}(c_p)$ vertei yra apibendrinama 3 lent., stulpelyje $P_{nuostoliai}$ pateikiami aktyviosios galios nuostoliai žemosios įtampos elektros skirstymo linijose, modeliuojami pagal komponentus R_w ir L_w ir išreikšti procentais nuo 2 ir 3 apkrovų sunaudojamos suminės aktyviosios galios. Stulpelyje ΔU pateikiamas įtampos kritimas linijoje tarp PM ir TM, išreikštas procentais nuo tinklo įvesties įtampos šaltinio. Galios koeficientas (angl. *Power Factor*), apibrėžiamas kaip aktyviosios ir pilnutinės galios santykis ir matuojamas pagal PM ir TM rodmenis, yra žymimas atitinkamai PF_{PM} ir PF_{TM} .



3.2 pav. Apkrovos modelių tipai: (a) aktyvioji tiesinė apkrova, (b) lygiagretus aktyviosios tiesinės ir netiesinės apkrovos junginys, (c) nuoseklus tiesinių induktyvinės ir varžinės apkrovų junginys, (d) lygiagretus induktyvinės ir varžinės apkrovų junginys



3.3 pav. Netiesinės apkrovos modelis

Netiesinės apkrovos modelio apkrovos aktyviosios galios dydis nustatytas ~ 100 W, empiriškai parenkant modelio komponentų vertes. Tiriant didesnės galios netiesinių apkrovų poveikį, modelyje (3.1 pav.) buvo prijungiama keletas tokių pat netiesinės apkrovos modelių (3.3 pav.) lygiagrečiai.

2 lentelė. Modeliavimui naudotų apkrovų parametrai

Eilės nr.	1 apkrovos parametrai			2 apkrovos parametrai				3 apkrovos parametrai				
	Tipas	P_b , W	R , Ω	Tipas	P_b , W	R , Ω	P_{NLL} , W	Tipas	P_i ar P_{LRS} ar P_{LRp} , W	R , Ω	P_{NLL} , W	L , mH
1	a	1056	50	a	552	90	ne	b	292	170	279	ne
2	a	1056	50	b	292	170	278	b	292	170	278	ne
3	a	1056	50	a	527	90	ne	b	948	50	443	ne
4	a	1056	50	b	279	170	266	b	948	50	442	ne
5	a	1056	50	a	553	90	ne	a	553	90	ne	ne
6	a	1056	50	b	292	170	279	a	552	90	ne	ne
7	a	1056	50	a	554	90	ne	c	461	10	ne	100
8	a	1056	50	b	293	170	279	c	461	10	ne	100
9	-	ne	ne	-	ne	ne	ne	d	1043	50	ne	150
10	-	ne	ne	-	ne	ne	ne	d	1044	50	ne	70
11	-	ne	ne	-	ne	ne	ne	d	1052	50	ne	150
12	-	ne	ne	-	ne	ne	ne	d	1053	50	ne	70
13	-	ne	ne	-	ne	ne	ne	d	1066	50	ne	10

Pastaba: ne – neprijungta

3.1.2 Rezultatai

Kompiuterinio modeliavimo būdu gauti rezultatai pateikti 3 lentelėje. Joje taip pat nurodomi galios faktoriai, įvertinti PM ir TM įdiegimo vietose, atitinkamai PF_{PM} ir PF_{TM} .

3 lentelė. Modeliavimo rezultatai ir modeliavimo sąlygos

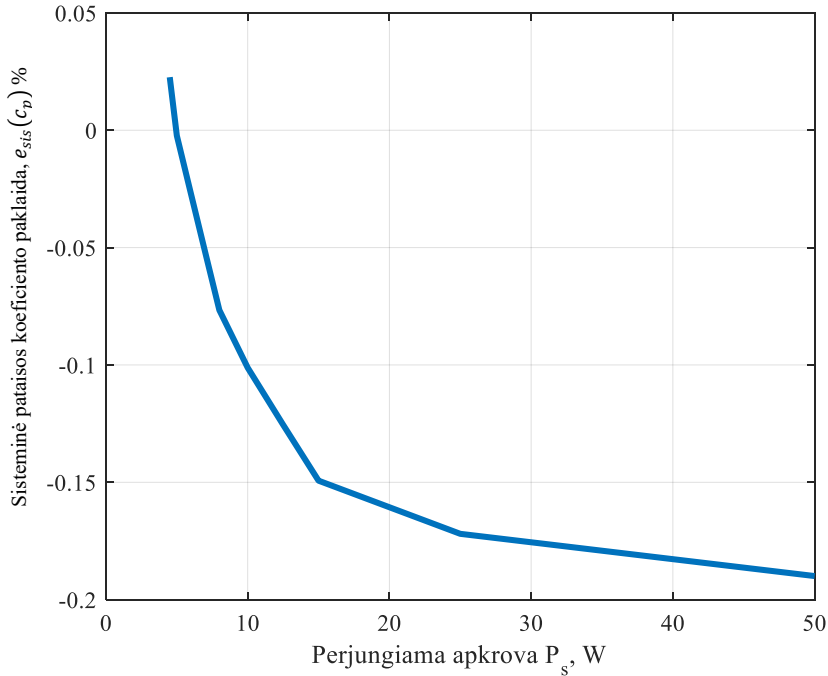
Eilės Nr.	$e_{sis}(c_p)$ ppm	$P_{nuostoliai}$ %	ΔU , %	PF_{PM}	PF_{TM}	R_w , Ω	L_w , uH
1	-46	3,1	3,1	0,99	0,98	1,37	53
2	-491	3,2	3,2	0,99	0,98	1,37	53
3	-338	5,6	5,3	0,99	0,99	1,37	53
4	-799	6,5	5,3	0,99	0,99	1,37	53
5	266	3,1	3,0	1,00	1,00	1,37	53
6	-46	3,1	3,1	1,00	1,00	1,37	53
7	-2638	8,4	2,9	0,83	0,30	1,37	53
8	-2557	7,6	2,9	0,85	0,30	1,37	53
9	-16	1,4	0,8	0,69	0,68	0,34	42
10	-279	4,2	0,8	0,42	0,40	0,34	42
11	14	0,6	0,4	0,69	0,68	0,14	38
12	-28	1,7	0,4	0,41	0,40	0,14	38
13	-2268	69,4	0,8	0,11	0,06	0,14	38

Pastabos: $R_w = 1,37 \Omega$ atitinka 100 m 2,5 mm² skerspjūvio varinį laidą, $R_w = 0,34 \Omega$ atitinka 100 m 10 mm² skerspjūvio varinį laidą, $R_w = 0,14 \Omega$ atitinka 100 m 25 mm² skerspjūvio varinį laidą, $R_s = 5 \text{ k}\Omega$.

Analizuojant rezultatus, pateiktus 3 lentelėje, galima pastebėti, kad didžiausią įtaką sisteminei pataisos koeficiento paklaidai daro aktyviosios galios nuostoliai $P_{nuostoliai}$ bei galios faktoriai PF_{TM} ir PF_{PM} . Pataisos koeficiento paklaida $e_{sis}(c_p)$ didėja didėjant aktyviesiems galios nuostoliams $P_{nuostoliai}$. Paprastai žemosios įtampos elektros skirstymo tinklas yra projektuojamas laikantis rekomendacijų, kad žemosios įtampos elektros skirstymo linijų aktyviosios galios nuostoliai ΔU neviršytų 5 % tiekiamos aktyviosios galios. Remiantis 3 lentelėje pateiktais duomenimis, net esant didesniems galios nuostoliams $P_{nuostoliai}$ žemosios įtampos elektros skirstymo linijose bei esant mažoms galios faktoriaus reikšmėms (0,5 ir mažiau) (3, 4, 7, 8 ir 13 eilutės), paklaidos modulis $e_{sis}(c_p)$ neviršijo 0,26 %. Galima daryti prielaidą, kad net esant ypač mažoms galios faktoriaus reikšmėms (kurios mažai tikėtinos praktikoje) gaunamos sisteminės paklaidos yra mažos, todėl esant realioms sąlygoms sisteminės pataisos koeficiento paklaidos neturėtų būti didesnės nei gautos paklaidos. Galima pastebėti, kad mažėjant galios koeficientui (PF_{PM} arba PF_{TM}) padidėja aktyviosios

galios nuostoliai žemosios įtampos elektros skirstymo linijose ir atitinkamai padidėja paklaida $e_{sis}(C_p)$.

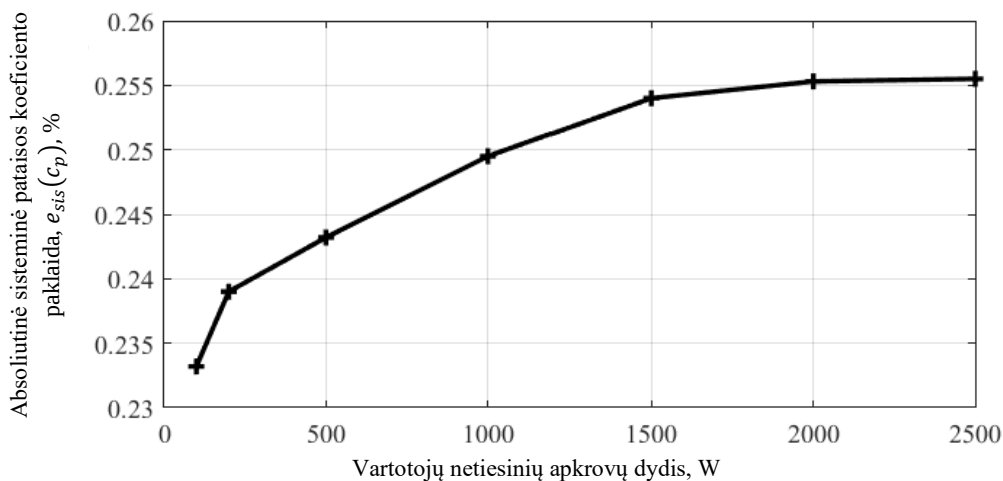
Aktyviosios galios pataisos koeficiento paklaidos priklausomybė nuo papildomos apkrovos P_s (stimulo) dydžio pavaizduota 3.4 pav.



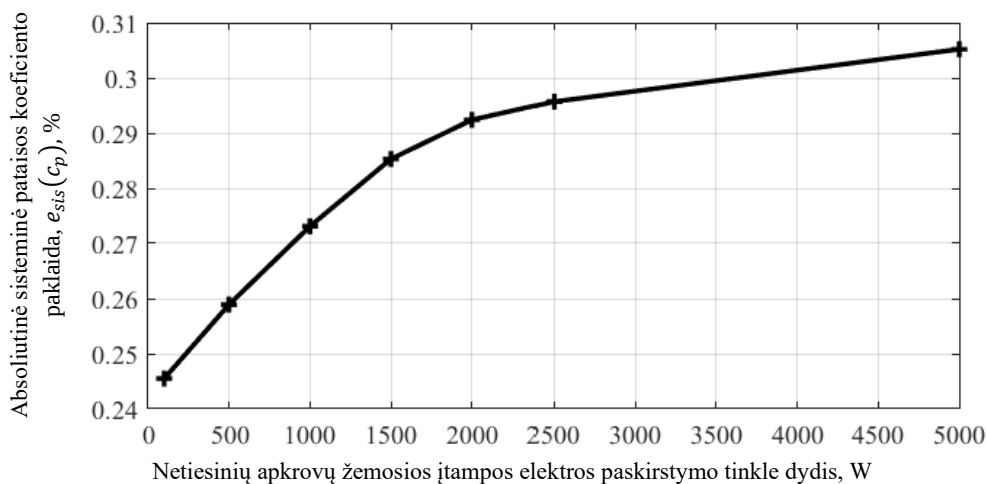
3.4 pav. Aktyviosios galios pataisos koeficiento paklaidos priklausomybė nuo papildomos perjungiamos apkrovos dydžio

Kaip matome iš 3.4 pav., didėjant papildomos perjungiamos apkrovos P_s dydžiui sisteminė modelio paklaida auga, nes didėjanti papildoma apkrova įneša į elektros tinklą papildomus galios nuostolius bei įtampos kritimą tinkle. Tačiau tai nereiškia, jog norint gauti mažiausias aktyviosios galios pataisos koeficiento paklaidas reikia naudoti kiek įmanoma mažesnės aktyviosios galios papildomą apkrovą. Papildomos perjungiamos apkrovos P_s vartojamos galios matavimas atliekamas pilnos vartotojo vartojamos galios diapazone, todėl yra veikiamas matuoklio skyros, kuri tampa artima perjungiamos apkrovos varžos nominalui. Pilnoji pataisos koeficiento paklaida susideda iš dviejų dedamųjų, tai yra, sisteminių ir atsitiktinių paklaidų. Taigi norint parinkti tinkamą papildomos perjungiamos apkrovos P_s dydį reikia įvertinti ir atsitiktinių paklaidų įtaką pataisos koeficiento paklaidai.

Pataisos koeficiento paklaidos priklausomybė nuo vartotojo netiesinės apkrovos dydžio pavaizduota 3.5 pav., o nuo netiesinių apkrovų žemosios įtampos elektros skirstymo tinkle – 3.6 pav.



3.5 pav. Aktyviosios galios pataisos koeficiento sistemingosios paklaidos priklausomybė nuo vartotojo netiesinės apkrovų dydžio (kiti parametrai iš 4 varianto, žr. 3 lent.)



3.6 pav. Aktyviosios galios pataisos koeficiento sistemingosios paklaidos priklausomybė nuo žemosios įtampos elektros skirstymo tinklo dalyje tarp PM ir TM esančių netiesinių apkrovų, vartojo netiesinė apkrova 1 kW (kiti parametrai iš 4 varianto, žr. 3 lent.)

Atvejams, kai buvo tirta netiesinių apkrovų, kurių galia P_{NLL} didesnė už 100 W, įtaka metodo sistemingajai paklaidai, bendras apkrovos modelis buvo sudarytas iš keleto lygiagrečiai sujungtų netiesinės apkrovos pavaizduotos (3.3 pav.) modelių. Remiantis rezultatais, gautais taikant modeliavimą, galima teigti, kad santykinei paklaidai absoliučioji C_p vertė nuo 0,5 iki 1,5 įtakos neturi.

3.2 Atsitiktinės metodo paklaidos dėl galios fluktuacijų tyrimas

3.2.1 Galios fluktuacijų elektros tinkle kilmė

Dėl žemosios įtampos elektros skirstomajame tinkle esančių apkrovų prijungimo, atjungimo ar jų dinaminio pobūdžio įtampai, srovei bei apkrovų galiai būdingos fluktuacijos. Gera žinoma, kad elektros apkrovų vartojama galia ir jos kitimas dėl galios nuostolių elektros linijose veikia žemosios įtampos skirstomojo tinklo įtampą [88]. Savo ruožtu mazgo įtampa įtakoja jame prijungtų apkrovų galios suvartojimą. Todėl galios ir įtampos fluktuacijos tinkle yra tarpusavyje susijusios. Galios ir įtampos fluktuacijos yra sudėtingi trikdžiai, kuriuos sukelia elektros galią vartojančių prietaisų galios dinamika, kurią lemia ir jų valdymo algoritmai. Tokioje kintančioje aplinkoje fiksuotos aktyviosios galios matavimas tampa gana sudėtinga užduotimi. Siūlomam nuotolinės TM paklaidų stebėsenos metodui labai svarbu, kad ganėtinai trumpos (keletas sekundžių) paklaidų įvertinimo procedūros metu visos prijungtos apkrovos tame pačiame potinklyje už PM vartotų stabilią aktyviąją galią. Apkrovų galios fluktuacijos turi įtakos matavimo rezultato dispersijai, nėra susijusios su papildomos perjungiamos apkrovos perjungimo greičiu. Todėl galios suvartojimo įverčių vidurkinimas yra veiksminga priemonė, siekiant sumažinti neapibrėžtumo komponentę, atsirandančią dėl galios svyravimų. Šiame skyriuje siekiama nustatyti fiksuotos aktyviosios apkrovos matavimo įvertinimo dispersijos santykį esant tipinėms žemosios įtampos elektros skirstomojo tinklo sąlygoms. Tikimasi, kad ilgesnis vidurkinimo laikotarpis leis sumažinti matavimo neapibrėžtį.

Standartuose EN 50160:2010 [89] ir IEEE 1159:2019 [90] apibrėžiami elektros energijos sistemose pasireiškiantys elektros energijos kokybę lemiantys (apibūdinantys) elektromagnetiniai reiškiniai. Trumpalaikiai efektinės įtampos vertės svyravimai yra elektros energijos kokybės parametrai, svarbūs šiuo tyrimu nagrinėjamai matavimo problemai. Trumpalaikiams efektinės įtampos svyravimams (pertrūkiai, kryčiai, bangavimai) priskiriami svyravimai, kurių trukmės siekia nuo 0,5 fundamentinio periodo iki 1 minutės. Įtampos svyravimai – tai sisteminiai efektinės įtampos reikšmės pokyčiai arba atsitiktinių įtampos pokyčių seka, kurių dydis paprastai neviršija standartuose nustatytų įtampos diapazonų (5 % nuo 230 V kintamosios įtampos). Įtampos svyravimai (ir virpesiai) paprastai atsiranda kaip vidutinės kvadratinės įtampos variacijos arba atsitiktiniai kintamos trukmės įtampos pokyčiai ir neviršija nustatyto kintamosios įtampos diapazono [91].

3.2.2 Galios fluktuacijų įtaka paklaidų stebėsenos metodo atsitiktinei paklaidai

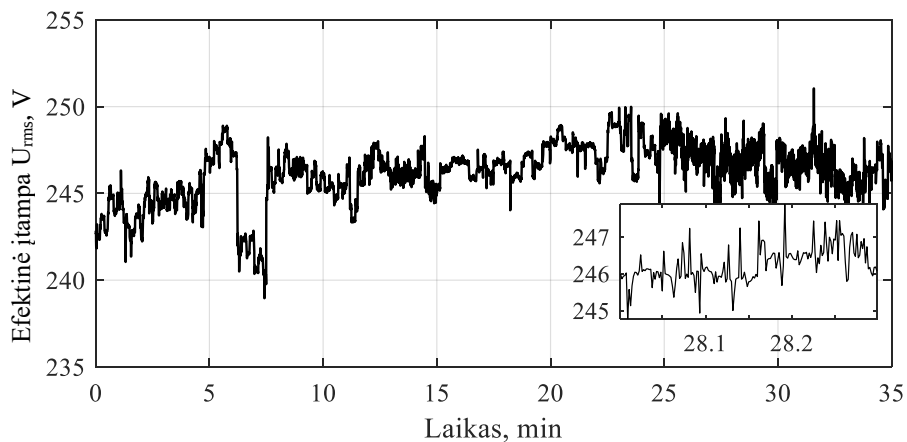
Aktyvioji galia, išmatuota EEM, priklauso nuo įtampos ir apkrovos (tiesinės ir (arba) netiesinės), prijungtos vartotojo namų ūkyje. Įtampą $U_n(t)$ k -tojo abonento EEM įvade lemia visų skirstomojo tinklo mazgų elektrinė apkrovų galia (poreikis) $P_{L(k)}$, $k = 1, K$ dėl įtampų kritimų elektros linijose (žiūrėti 2.2 pav.). Išskaidykime abonentų

elektrinės galios suvartojimą iki nominalios elektrinės galios suvartojimo $p_{Lnom}(t_i)$ ir svyravimų galios $p_{Lsvyr}(t_i)$ sumos:

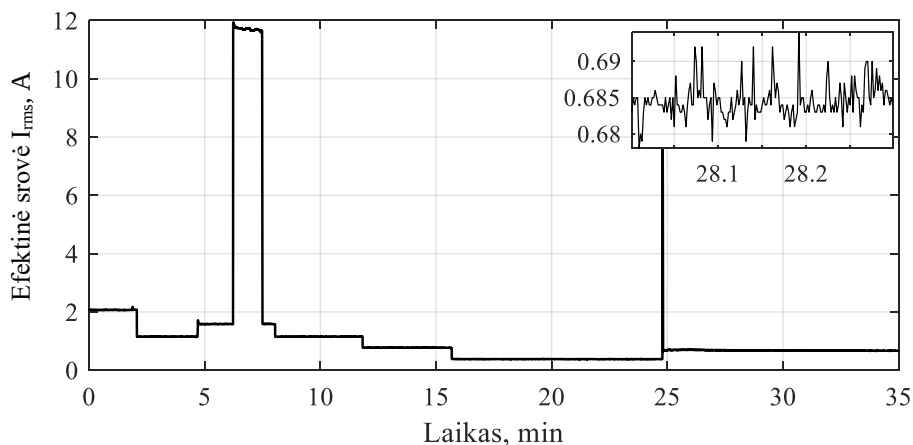
$$P_L(n \cdot t_s) = P_{Lnom}(n \cdot t_s) + P_{Lsvyr}(n \cdot t_s), \quad (29)$$

čia t_s yra elektrinės galios matavimo diskretizavimo periodas, o $n = 0 \div N$ yra atskiro galios įverčio numeris. Elektrinės galios svyravimus lemia įtampos svyravimai ir dinaminių apkrovų elgsena. Apkrovų vartojamos aktyviosios galios eksperimentiniai duomenys „1 duomenų rinkinys“ surinkti universiteto pastate, naudojant elektrinės galios analizatorių „Yokogawa WT310“ [41]. Eksperimentiškai išmatuoti tipiniai trumpalaikės įtampos, srovės bei aktyviosios galios fluktuacijos, 0,1 s skiriamąja geba. Šie matavimai atlikti įvairiomis sąlygomis skirtinguose žemosios įtampos skirstomuosiuose tinkluose:

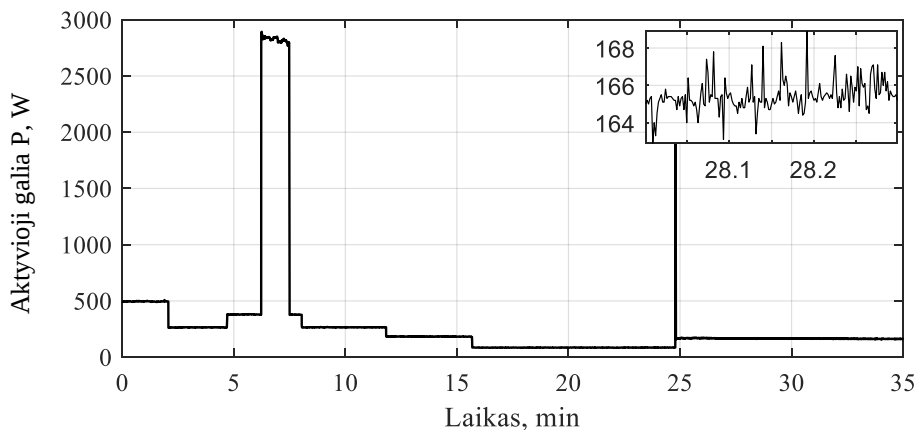
1. Gyvenamojo 2-jų aukštų privataus namo (statyto 1933 metais, nauja elektros instaliacija įrengta 2010 metais, elektros įvadas – 10 kW galingumo, tačiau darbai atlikti be projekto ir elektrinių schemų nėra) atveju įtampa vaizduojama 3.7 pav., srovė – 3.8 pav., aktyvioji galia – 3.9 pav.
2. 5-kių aukštų mokslo ir studijų paskirties universitetinio pastato (statyto 1969 metais, įvado leistina galingumo riba 12 kW, dėl daugybės nedokumentuotų elektros instaliacijos keitimo ar remonto darbų elektrinių schemų nėra) atveju įtampa parodyta 3.10 pav., srovė – 3.11 pav., aktyvioji galia – 3.12 pav.
3. Gyvenamojo penkiaaukščio daugiabučio pastato (statyto 1973 metais, vieno vartotojo įvado galia 6 kW, dėl daugybės nedokumentuotų elektros instaliacijos keitimo ar remonto darbų elektrinių schemų nėra) atveju įtampa pateikta 3.13 pav., srovė – 3.14 pav., aktyvioji galia – 3.15 pav.



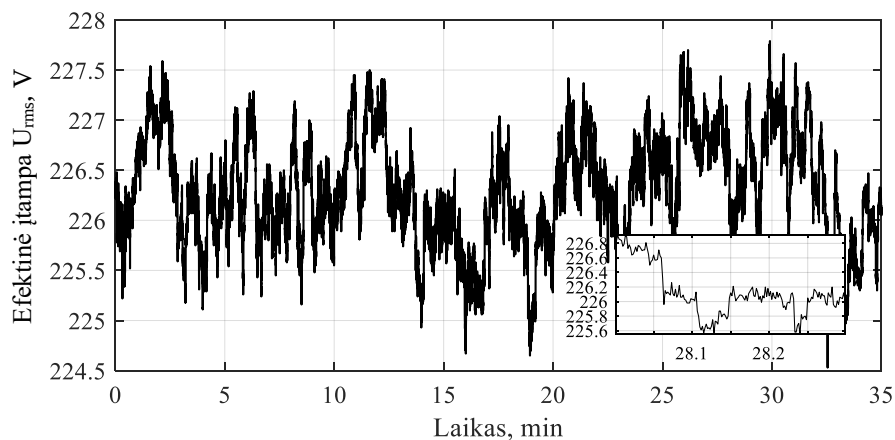
3.7 pav. Tipinis efektinės įtampos profilis privačiame name



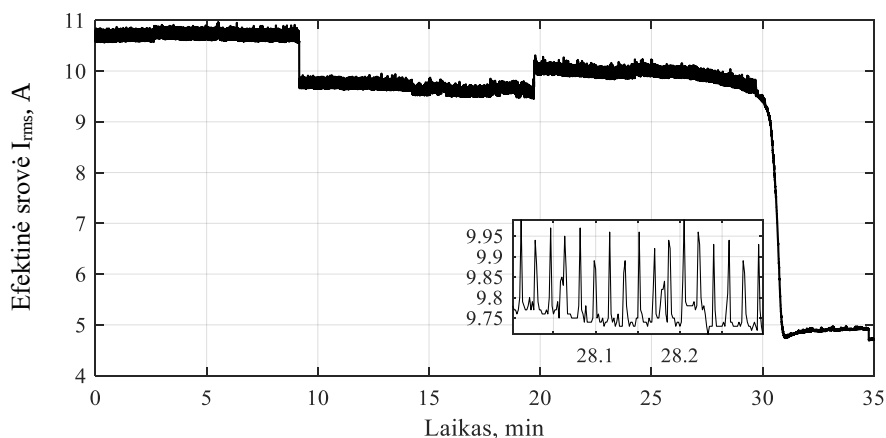
3.8 pav. Tipinis suvartojamos efektinės srovės profilis privačiame name



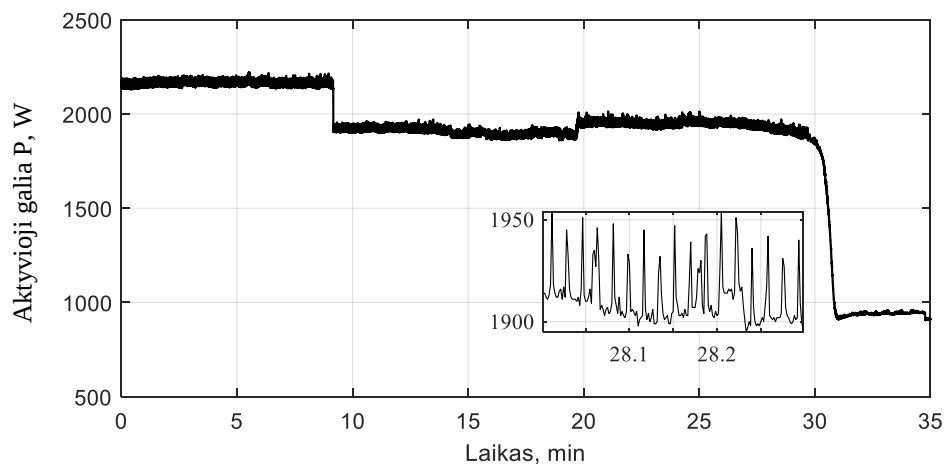
3.9 pav. Tipinis suvartojamos aktyviosios galios profilis privačiame name



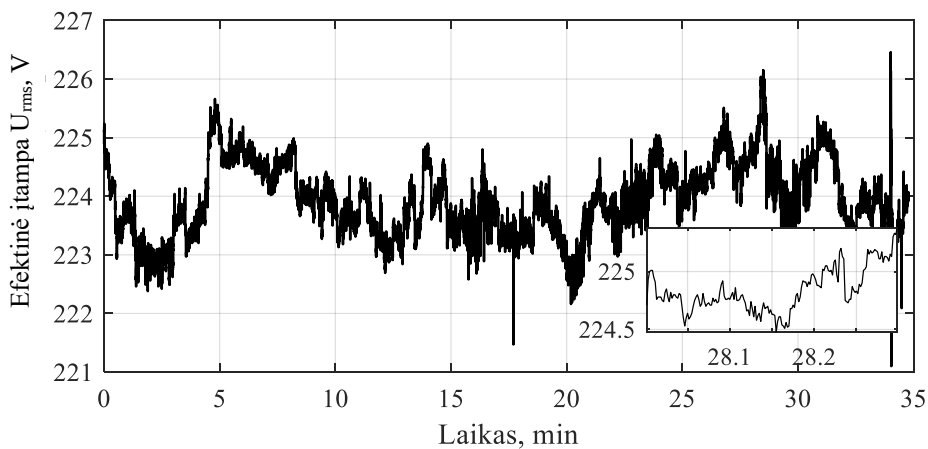
3.10 pav. Tipinis efektinės įtampos profilis universiteto pastate



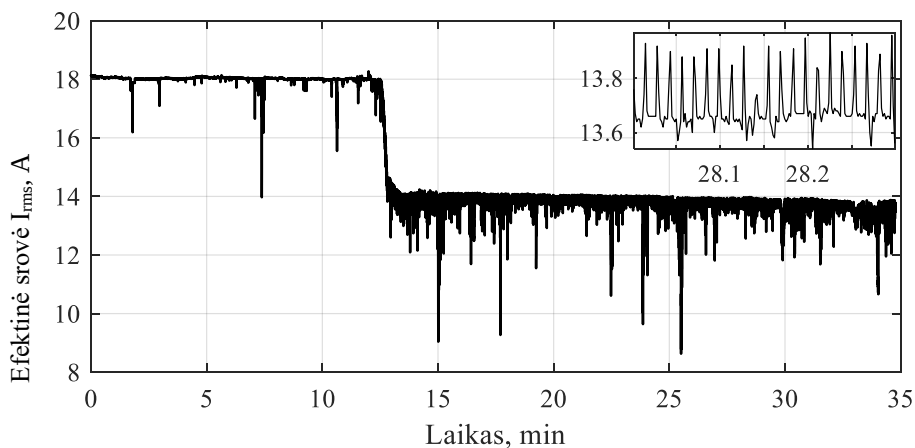
3.11 pav. Tipinis suvartojamos efektinės srovės profilis universiteto pastate



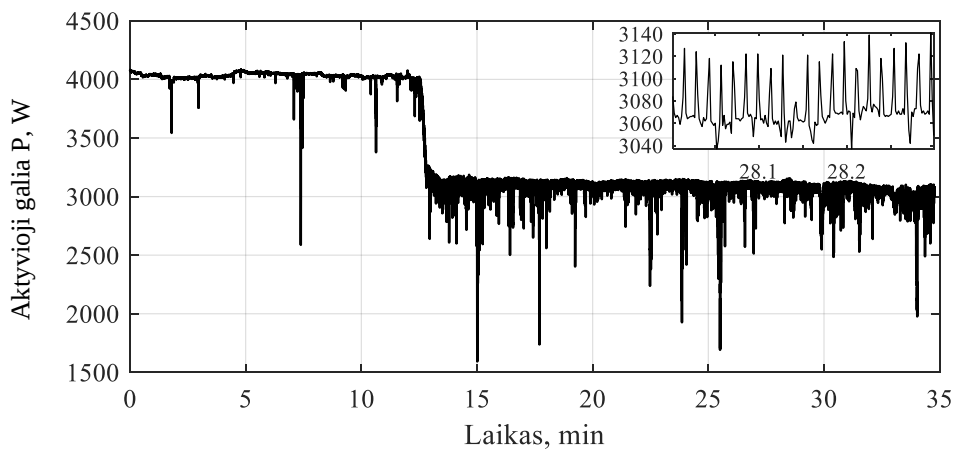
3.12 pav. Tipinis suvartojamos aktyviosios galios profilis universiteto pastate



3.13 pav. Tipinis efektinės įtampos profilis daugiabučiame name

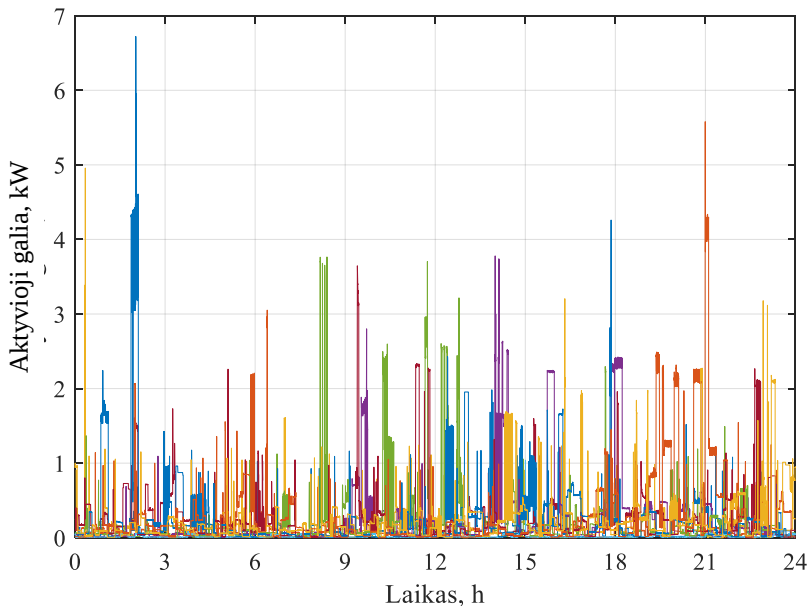


3.14 pav. Tipinis suvartojamos efektinės srovės profilis daugiabučiame name



3.15 pav. Tipinis suvartojamos aktyviosios galios profilis daugiabučiame name

Sintezuoti elektrinės galios profiliai taip pat buvo naudojami nagrinėjant svyravimų poveikį elektrinės galios suvartojimo įverčių sklaidai. Kiek mums žinoma, šiuo metu atviros prieigos duomenų šaltiniuose galima rasti tik 1 s laiko skiriamąją gebą įrašytus galios profilius [92]. Kai kuriuose kituose šaltiniuose minimi eksperimentiniai pagrindinių buitinių prietaisų apkrovos profiliai, kurių skiriamoji geba yra 1 s [92, 93]. Elektrinės galios profilių 1 min. skiriamoji geba [93]–[97] yra nepakankama trumpalaikių svyravimų dispersijos analizei. Šaltinio [98] autoriai pasiūlė būsenos erdvės modelį, skirtą elektrinės galios suvartojimo dinamikai apibūdinti trumpuoju laikotarpiu, 500 ms skiriamąją geba. Tačiau iš pradžių modeliu buvo siekiama prognozuoti aktyviosios galios matavimo įverčius iš anksčiau išmatuotų įverčių, o taikant laiko eilutės generavimo metodą nebuvo modeliuojamas abonentų apkrovos keitimas ilgesniam laiko intervalui. Galiausiai pasirinkome duomenų rinkinį, pavadintą „2 duomenų rinkiniu“, kurį pateikė šaltinio [92] autoriai. 10 iš 74 tipinių „2 duomenų rinkinio“ Vokietijos namų ūkių aktyviosios galios profilių pateikti 3.16 pav.

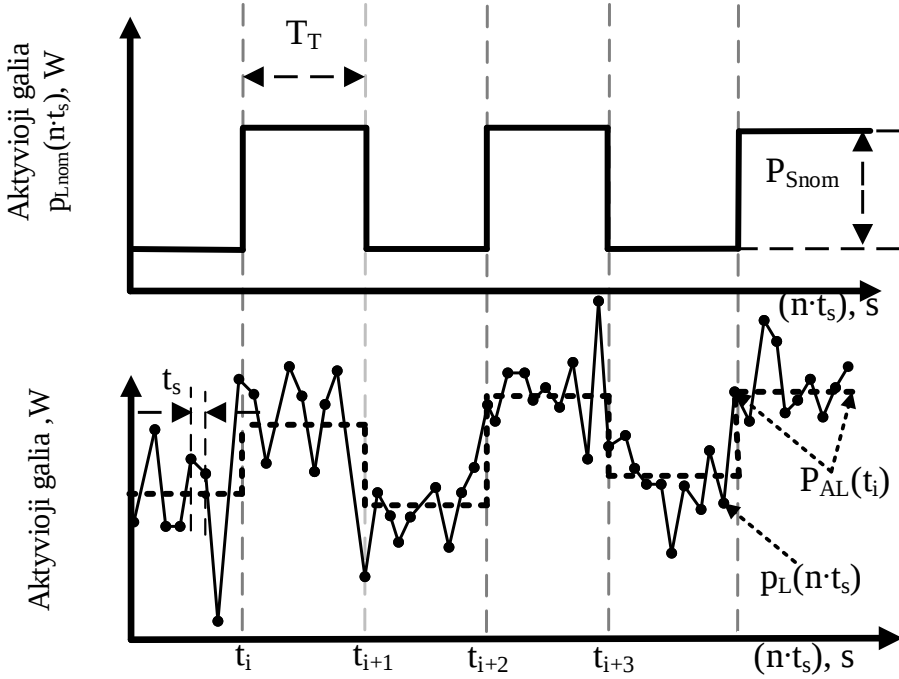


3.16 pav. 10-ties namų ūkių aktyviosios galios profiliai („2 duomenų rinkinys“) [92]

Pasak šaltinio [92] autorių, apibendrinamieji individualūs kasdieniai įvairių namų ūkio apkrovos profiliai modeliuoja vartotojų kintančią apkrovą ir tipinius apkrovos svyravimus.

Tarkime, kad pasirinktu laikotarpiu (T_T) yra prijungiama tam tikra varžinė apkrova P_S (3.17 pav.), taikant nuotolinį TM pataisos koeficiento apskaičiavimo metodą žr. 2.2 pav. Siekiant nustatyti pataisos koeficiento reikšmę, naudojant TM ir PM, galios fluktuacijų įtaką reikėtų sumažinti. Fluktuacijų įtaką galima sumažinti

kartotinai perjungiant apkrovą ir vidurkinant gautus elektrinės aktyviosios galios įverčius.



3.17 pav. Prijungiamos papildomos 10 W apkrovos matavimas (T_T – papildomos apkrovos įjungimo intervalas, P_{Snom} – nominali papildomos apkrovos vertė, t_s – diskretizavimo periodas, n – aktyviosios galios įverčių skaičius, $P_{AL}(t_i)$ – efektyvioji aktyvioji galia tam tikrai laiko intervalu t_i , P_{Lnom} – vienetinis aktyviosios galios įvertis kurio diskretizavimo periodas yra t_s)

Išmatuotų elektrinių galių skirtumą pažymime tokia formule:

$$\Delta P_{Ai} = P_{AL}(t_i) - P_{AL}(t_{i+1}), \quad (30)$$

čia $P_{AL}(t_i)$ ir $P_{AL}(t_{i+1})$ yra vidutinės elektrinės galios atitinkamais laiko intervalais $[t_i, t_i + T_T]$ ir $[t_{i+1}, t_{i+1} + T_T]$, t. y.

$$P_{AL}(t_i) = \frac{1}{T_T/t_s} \sum_{n=1}^{T_T/t_s} p_L(n \cdot t_s). \quad (31)$$

Taip pat $P_{ML}(t_i)$ ir $P_{ML}(t_{i+1})$ galima apibrėžti kaip atitinkamų intervalų aktyviosios galios įverčių medianos vertes. Tokiu atveju (33) formulėje esantį elektrinių galių skirtumą (Δp_{Ai}) galima pažymėti ir kaip aktyviosios galios medianų skirtumą Δp_{Mi} .

Darant prielaidą, kad nominalios apkrovos elektrinė galia P_{Lnom} yra pastovi laiko intervalu $[t_{i+1}, t_{i+1} + T_T]$, t. y. vartotojo apkrovos veikia pastovios būsenos režimu, o

apkrova P_R įjungiamo t_{i+1} momentu, galima perrašyti (31) formulę, pakeičiant (30) formulę:

$$\Delta P_{Ai} = P_{Snom} + (P_{ALsvyr}(t_i) - P_{ALsvyr}(t_{i+1})), \quad (32)$$

čia ΔP_{Ai} yra atsitiktinis kiekis, kurio dispersija nustatoma pagal galios fluktuacijų turinį, o P_{Snom} yra nominali aktyvioji galia, kurią suvartoja papildoma perjungiamo varžinė apkrova.

Įtampos svyravimai, kurie lemia rezistoriaus elektrinės galios suvartojimo svyravimus, gali būti priskirti nariams $P_{ALsvyr}(t_i)$ ir $P_{ALsvyr}(t_{i+1})$. Todėl P_{rnom} yra pastovi apkrova, neturinti įtakos ΔP_{Ai} dispersijai. Toliau analizuodami svyravimų dispersiją, mes nagrinėjame tik šių elektrinių galių svyravimų skirtumą:

$$\Delta P_{fAi} = P_{ALsvyr}(t_i) - P_{ALsvyr}(t_{i+1}). \quad (33)$$

Jeigu gaunant ΔP_{fAi} intervalu $[t_i, t_i + T_T]$ įvyksta nominalios apkrovos pokytis (jei yra išjungiamo / įjungiamą ar apkrova pakeičia savo darbo režimą, dėl ko staigiai pasikeičia elektros vartojimas), gautas ΔP_{fAi} dydis turėtų būti nufiltruotas kaip netinkamas. Dėl to įvedamas duomenų aibės filtravimas, pagal kurį duomenys, netenkinantys filtravimo sąlygos (34), yra pašalinami iš duomenų rinkinio:

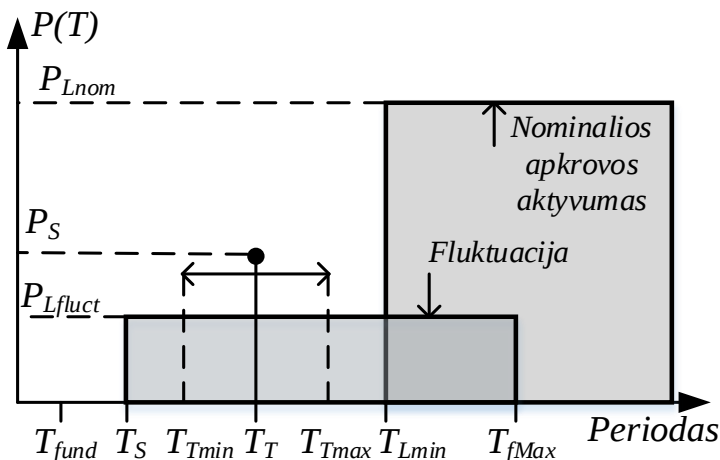
$$\Delta P_{fAi} > \Delta P_{TH}. \quad (34)$$

Siekiant sumažinti svyravimų įtaką, naudinga gauti N ΔP_{fAi} reikšmių ir apskaičiuoti jų vidutinę vertę, kuriai būdingas standartinis nuokrypis:

$$\delta[M\{\Delta P_{fA}\}] = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\Delta P_{Ai} - M\{\Delta P_{fA}\})^2}. \quad (35)$$

Atitinkamos lygtys gali būti užrašytos vidurkiui $M\{\Delta p_{fM}\}$ ir jo standartiniame nuokrypiui $\sigma[M\{\Delta p_{fM}\}]$, jeigu vidutinės elektrinės galios įverčiai $P_{AL}(t_i)$ ir $P_{AL}(t_{i+1})$ (30) formulėje atitinkamuose intervaluose pakeičiami medianiniais įverčiais $P_{ML}(t_i)$ ir $P_{ML}(t_{i+1})$.

Nominalių apkrovų aktyvumo (kai vartotojo prietaisai įjungti / išjungti) spektrinė sudėtis, elektrinės galios svyravimai tinkle (fluktuacijos) ir apkrovos P_s perjunginėjimo periodas yra parodyti 3.18 pav. Daroma prielaida, kad didžiąją laiko dalį vartotojų apkrovų vartojamos galios kitimo sparta dėl jų įjungimo / išjungimo, darbo režimo kitimo ar pan. retai bus trumpesnė negu $T_{Lmin} = 5$ s.



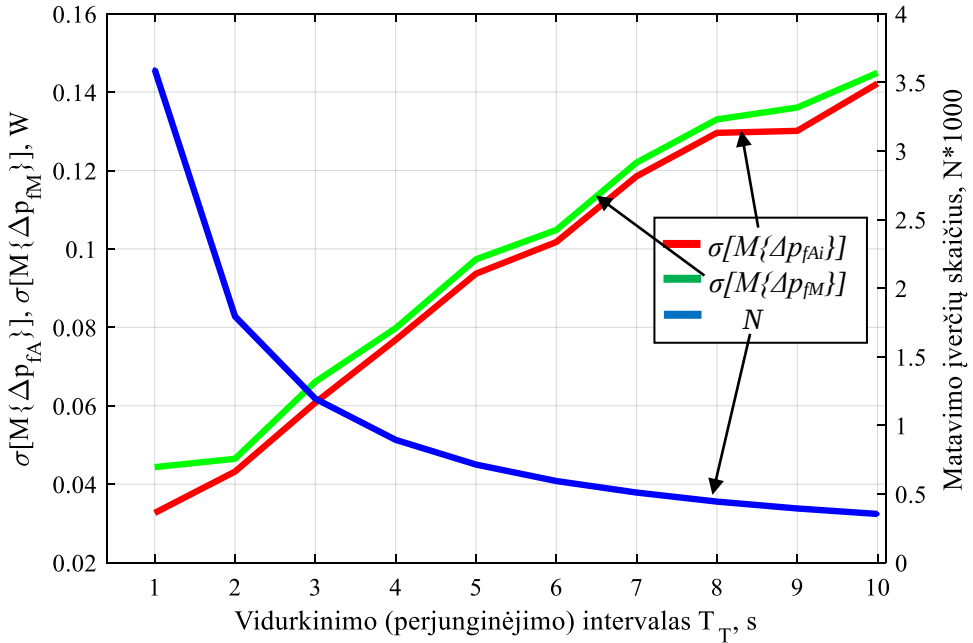
3.18 pav. Elektrinės galios ir įtampos svyravimų spektrinė sudėtis (T_{fund} – fundamentinis periodas 20 ms, T_S – diskretizavimo periodas (1 s arba 0,1 s), T_{Tmin} ir T_{Tmax} yra minimali arba maksimali papildomos apkrovos įjungimo intervalo trukmė (T_T), T_{Lmin} – minimali vartotojo apkrovų įjungimo / išjungimo ar darbo režimo sparta, T_{fmax} – maksimali fluktuacijų trukmė, P_S – papildomos perjungiamos apkrovos vertė (~10 W), P_{Lnom} – nominali vartotojo apkrovos galia, P_{Lfluct} – aktyviosios galios fluktuacijų lygis vatais)

Daroma prielaida, kad įtampos (atitinkamai ir aktyviosios galios) svyravimų, kurių įtaką reikia sumažinti, trukmės nuo $T_S = 0,1$ s (arba 1 s) iki $T_{fmax} = 10$ s. Apatinė riba atitinka aktyviosios galios įverčių diskretizavimo periodą T_S , kuris gaunamas taikant elektrinės galios matavimo metodiką specifinėms sistemoms. Galios P_S perjungimo laikotarpis T_T pasirenkamas nuo $T_{Tmin} > T_S$ iki T_{Tmax} . Tipiškos naudojamos vertės yra nuo $T_{Tmin} = 1$ s iki $T_{Tmax} = 10$ s. Apibendrinant šiame skyriuje pateiktas apibrėžtis, atliekamo tyrimo tikslas yra nustatyti elektrinės galios svyravimų įtaką vidurkio $M\{\Delta p_{fA}\}$ standartiniam nuokrypiui $\sigma[M\{\Delta p_{fA}\}]$ ir išsiaiškinti, kaip efektyviai svyravimus galima sumažinti įvertinus gautų Δp_{fAi} duomenų rinkinį.

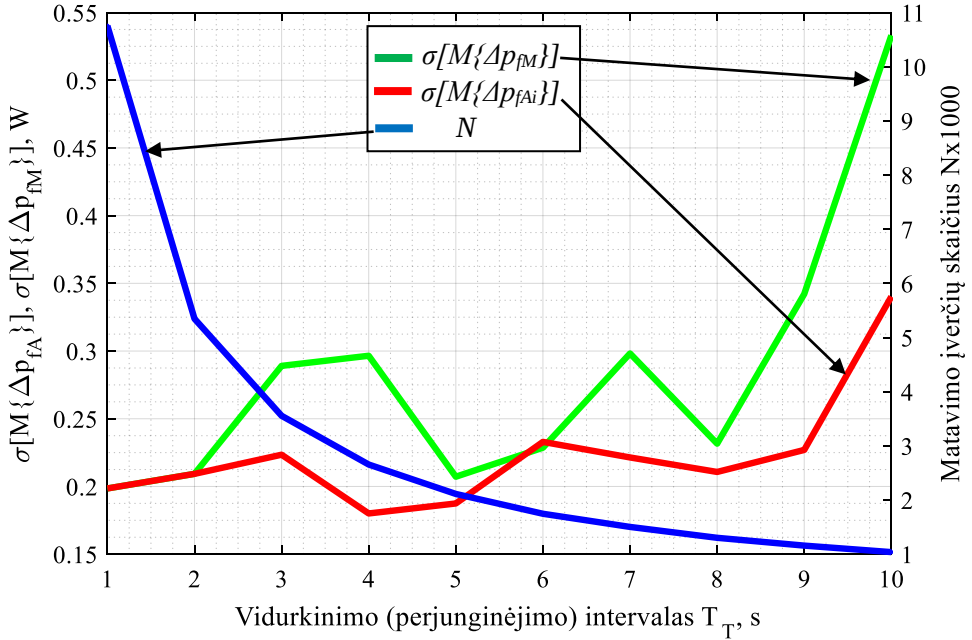
3.2.3 Galios fluktuacijų įtakos mažinimo galimybių analizė

Siekiant nustatyti elektros galios skirstomajame tinkle dispersiją pagal (38) formulę, buvo naudojami ir eksperimentiniai, ir apibendrinamieji sintezuoti galios suvartojimo duomenys. Eksperimentiškai išmatuotų galios matavimo įverčių diskretizavimo periodas buvo 0,1 s, o sintezuotų – 1 s. Siekiant ištirti svyravimų įtakos sumažinimą, buvo apskaičiuoti 1 val. trukmės, aktyviosios galios profiliai Δp_{fAi} ir Δp_{fMi} , o atitinkamai standartinio nuokrypio vertės $\sigma[M\{\Delta p_{fAi}\}]$ ir $\sigma[M\{\Delta p_{fMi}\}]$ buvo apskaičiuotos naudojantis skirtingus vidurkinimo T_T (perjungimo) intervalus. Gauti rezultatai pavaizduoti 3.19 pav. („1 duomenų rinkinys“) ir 3.20 pav. („2 duomenų rinkinys“). „1 duomenų rinkinio“ aktyviosios galios profilyje yra 36 000 1 val. trukmės matavimo įverčių. Jeigu vidurkinimo intervalas $T_T = 1$ s, $P_{ALsvyr}(t_L)$ matavimo įverčių skaičius yra atitinkamai 3 600, o jeigu vidurkinimo intervalas $T_T = 10$ s, įverčių

skaičius yra tik 360. Atrinkus duomenis pagal (40) taisyklę, naudojamų įverčių skaičius dar labiau sumažėja. Todėl pailginus vidurkinimo intervalą standartinis nuokrypis padidėja dėl sumažėjusio įverčių skaičiaus $N=(1 \text{ val.}) / T_T$, nepaisant galimai mažesnės Δp_{fAi} įverčių dispersijos. Naudojant „2 duomenų rinkinį“ (3.20 pav.) standartinio nuokrypių $\sigma[M\{\Delta p_{fA}\}]$ ir $\sigma[M\{\Delta p_{fM}\}]$ padidėjimas pailginus vidurkinimo intervalą yra mažiau akivaizdus.

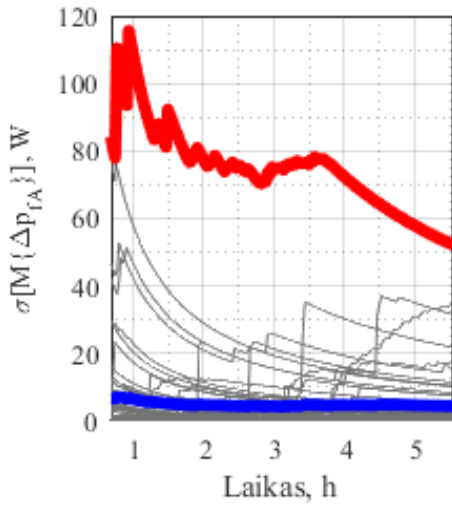


3.19 pav. $\sigma[M\{\Delta p_{fAi}\}]$ ir $\sigma[M\{\Delta p_{fM}\}]$ reikšmės gautos naudojant „1 duomenų rinkinį“ elektrinės galios profilius, (1 val., 0,1 s skiriamoji geba, netinkamų matavimų ribinis lygis $\Delta P_{TH} = 20$ W, panaudotų išmatuotų galios imčių skaičius N)

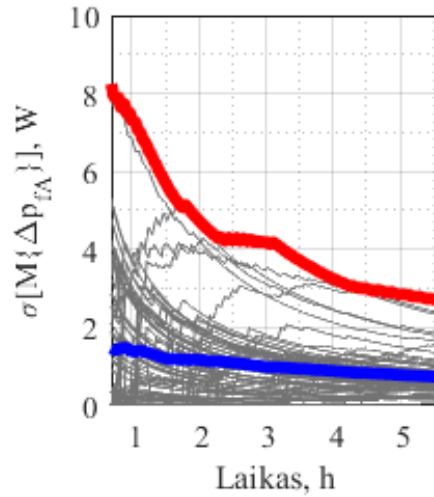


3.20 pav. $\sigma[M\{\Delta p_{Ai}\}]$ ir $\sigma[M\{\Delta p_M\}]$ reikšmės gautos naudojant „1 duomenų rinkinio“ elektrinės galios profilius (3 val., 1 s skiriamoji geba, netinkamų matavimų ribinis lygis $\Delta P_{TH} = 20$ W, panaudotų išmatuotų galios imčių skaičius N)

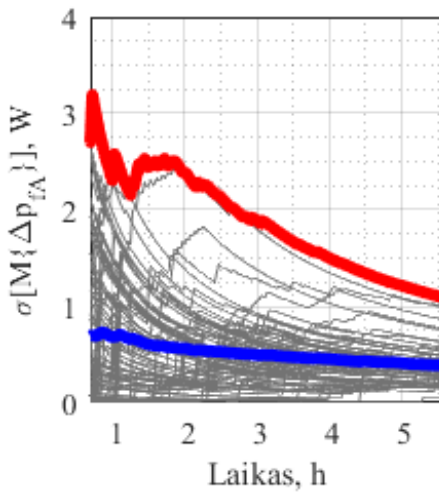
„2 duomenų rinkinio“ 74 elektrinės galios profiliai buvo panaudoti apskaičiuojant $\sigma[M\{\Delta p_{Ai}\}]$ statistinę priklausomybę nuo vidurkinimo trukmės, darant prielaidą, kad $T_T = 5$ s. Apskaičiuoti vidutinio ir blogiausio atvejo scenarijai, kurie gauti panaudojus vidurkinimo metodą pavaizduoti 3.21 pav., 3.22 pav., 3.23 pav. ir 3.24 pav. bei panaudojus medianos įvertinimą – 3.25 pav., 3.26 pav., 3.27 pav. ir 3.28 pav.



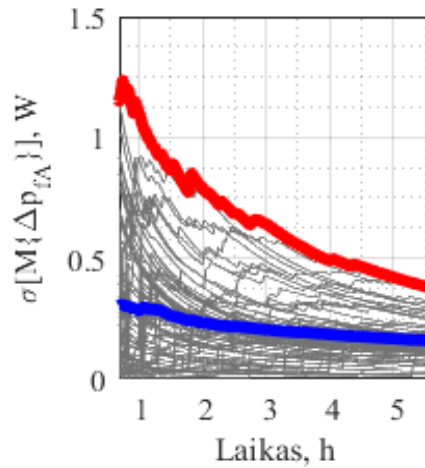
3.21 pav. $\sigma[M\{\Delta p_{fA}\}]$ standartinio nuokrypio reikšmės gautos naudojant „2 duomenų rinkinio“ 74 aktyviosios galios profilius: blogiausias bei vidutinis atvejai paryškinti ($T_T = 5$ s, duomenų filtravimas nenaudojamas)



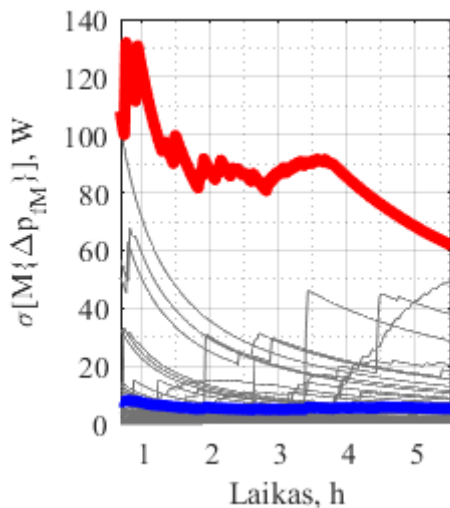
3.22 pav. $\sigma[M\{\Delta p_{fA}\}]$ standartinio nuokrypio reikšmės gautos naudojant „2 duomenų rinkinio“ 74 aktyviosios galios profilius: blogiausias bei vidutinis atvejai paryškinti ($T_T = 5$ s) $\Delta P_{TH} = 100$ W



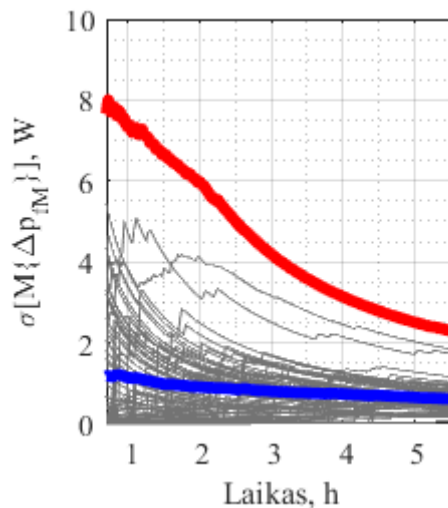
3.23 pav. $\sigma[M\{\Delta p_{fA}\}]$ standartinio nuokrypio reikšmės gautos naudojant „2 duomenų rinkinio“ 74 aktyviosios galios profilius: blogiausias bei vidutinis atvejai paryškinti ($T_T = 5$ s, $\Delta P_{TH} = 50$ W)



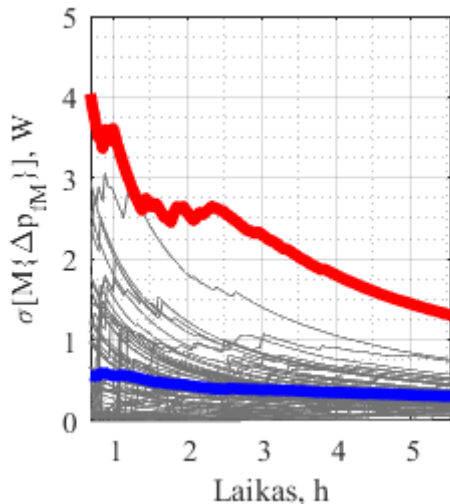
3.24 pav. $\sigma[M\{\Delta p_{fA}\}]$ standartinio nuokrypio reikšmės gautos naudojant „2 duomenų rinkinio“ 74 aktyviosios galios profilius: blogiausias bei vidutinis atvejai paryškinti ($T_T = 5$ s, $\Delta P_{TH} = 20$ W)



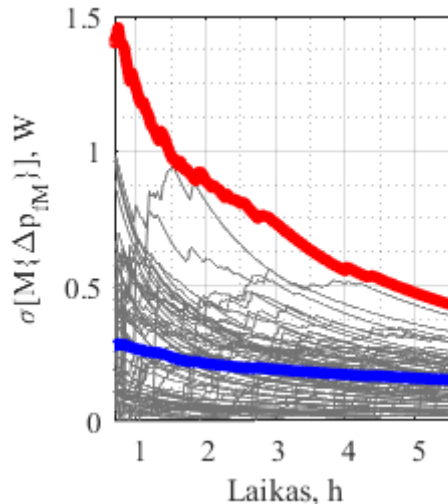
3.25 pav. $\sigma[M\{\Delta p_{TM}\}]$ standartinio nuokrypio reikšmės gautos naudojant „2 duomenų rinkinio“ 74 aktyviosios galios profilius: blogiausias bei vidutinis atvejai paryškinti ($T_T = 5$ s, duomenų filtravimas nenaudojamas)



3.26 pav. $\sigma[M\{\Delta p_{TM}\}]$ standartinio nuokrypio reikšmės gautos naudojant „2 duomenų rinkinio“ 74 aktyviosios galios profilius: blogiausias bei vidutinis atvejai paryškinti ($T_T = 5$ s) $\Delta P_{TH} = 100$ W



3.27 pav. $\sigma[M\{\Delta p_{TM}\}]$ standartinio nuokrypio reikšmės gautos naudojant „2 duomenų rinkinio“ 74 aktyviosios galios profilius: blogiausias bei vidutinis atvejai paryškinti ($T_T = 5$ s, $\Delta P_{TH} = 50$ W)



3.28 pav. $\sigma[M\{\Delta p_{TM}\}]$ standartinio nuokrypio reikšmės gautos naudojant „2 duomenų rinkinio“ 74 aktyviosios galios profilius: blogiausias bei vidutinis atvejai paryškinti ($T_T = 5$ s, $\Delta P_{TH} = 20$ W)

$\sigma[M\{\Delta p_{fA}\}]$ ir $\sigma[M\{\Delta p_{fM}\}]$ įverčių vertės po 3 val. vidurkinimo pateiktos 4 ir 5 lentelėse.

4 lentelė. Δp_{fA} verčių vidurkio standartinis nuokrypis po 3 val. vidurkinimo

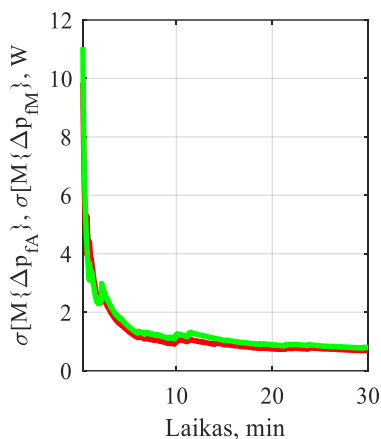
Duomenų aibės filtravimo slenkstis	Vidutinio atvejo scenarijus $\sigma[M\{\Delta p_{fA}\}]$, W	Blogiausio atvejo scenarijus $\sigma[M\{\Delta p_{fA}\}]$, W	Minimalus filtruotų imčių skaičius	Vidutinis filtruotų imčių skaičius	Maksimalus filtruotų imčių skaičius
Be duomenų aibės filtravimo	4,45	72,96	-	-	-
$\Delta P_{TH}=100$ W	0,98	4,24	3	64	262
$\Delta P_{TH}=50$ W	0,55	1,89	13	98	374
$\Delta P_{TH}=20$ W	0,20	0,62	23	150	502

5 lentelė. Δp_{fM} verčių vidurkio standartinis nuokrypis po 3 val. vidurkinimo

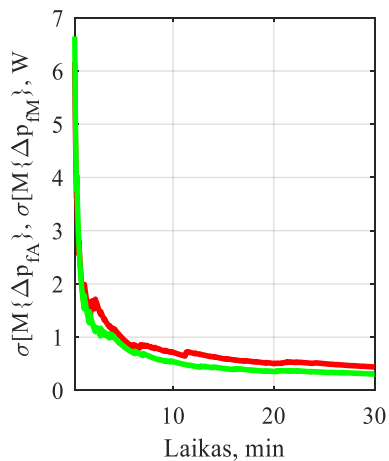
Duomenų aibės filtravimo slenkstis	Vidutinio atvejo scenarijus $\sigma[M\{\Delta p_{fM}\}]$, W	Blogiausio atvejo scenarijus $\sigma[M\{\Delta p_{fM}\}]$, W	Minimalus filtruotų imčių skaičius	Vidutinis filtruotų imčių skaičius	Maksimalus filtruotų imčių skaičius
Be duomenų aibės filtravimo	5,04	85,91	-	-	-
$\Delta P_{TH}=100$ W	0,86	4,16	2	64	262
$\Delta P_{TH}=50$ W	0,37	2,30	8	84	302
$\Delta P_{TH}=20$ W	0,20	0,72	20	124	398

Panaudojus duomenų aibės filtravimo (34) sąlygą, reikšmingai sumažėja standartinis nuokrypis $\sigma[M\{\Delta p_{fA}\}]$. Apskaičiuojant 4 lent. nurodytą vidutinio atvejo scenarijų, iš 2 160 įverčių buvo nufiltruoti 55 įverčiai, kai $\Delta P_{TH}=100$ W ir 112 išskirtys, kai $\Delta P_{TH}=20$ W. Kadangi P_S dydis pagal antrame skyriuje aprašytą taikymo metodą yra apie 10 W, $\Delta P_{TH}=20$ W tinkamas filtravimo lygis. Duomenų aibės filtravimas paaiškinamas grindžiamas poreikiu į elektrinės galios profilio, atitinkančio abonentų apkrovą P_L , P_{L2} , P_{LK} vidurkinimo momentus neįtraukti įjungimo / išjungimo (nominalios elektrinės galios suvartojimo pokyčių).

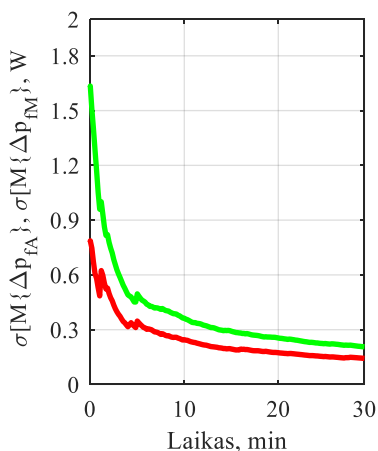
Naudojant „1 duomenų rinkinio“ elektrinės galios profilius ir nustatytą ribinį filtravimo lygį $\Delta P_{TH}=20$ W, standartinį nuokrypį $\sigma[M\{\Delta p_{fA}\}] = 0,1$ W galima pasiekti maždaug po 6 min. vidurkinimo (žr. 3.32 pav.). Ši trukmė atrodo priimtina įgyvendinant nuotolinę aktyviosios galios paklaidų stebėsenos procedūrą.



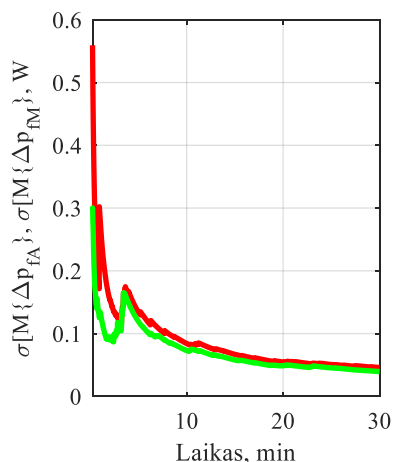
3.29 pav. $\sigma[M\{\Delta\}p_{fA}]$ (raudonai) ir $\sigma[M\{\Delta\}p_{fM}]$ (žaliai) gauti iš „1 duomenų rinkinio“ elektrinės galios profilių (1 val., 0,1 s skiriamoji geba, $T_T=2$ s, duomenų filtravimas nenaudojamas)



3.30 pav. $\sigma[M\{\Delta\}p_{fA}]$ (raudonai) ir $\sigma[M\{\Delta\}p_{fM}]$ (žaliai) gauti iš „1 duomenų rinkinio“ elektrinės galios profilių (1 val., 0,1 s skiriamoji geba, $T_T=2$ s, $\Delta P_{TH}=100$ W)



3.31 pav. $\sigma[M\{\Delta\}p_{fA}]$ (raudonai) ir $\sigma[M\{\Delta\}p_{fM}]$ (žaliai) gauti iš „1 duomenų rinkinio“ elektrinės galios profilių (1 val., 0,1 s skiriamoji geba, $T_T=2$ s, $\Delta P_{TH}=50$ W)



3.32 pav. $\sigma[M\{\Delta\}p_{fA}]$ (raudonai) ir $\sigma[M\{\Delta\}p_{fM}]$ (žaliai) gauti iš „1 duomenų rinkinio“ elektrinės galios profilių (1 val., 0,1 s skiriamoji geba, $T_T=2$ s, $\Delta P_{TH}=20$ W)

Kaip matyti iš prieš tai gautų rezultatų, reikšmingo skirtumo tarp $\sigma[M\{\Delta p_{fA}\}]$ ir $\sigma[M\{\Delta p_{fM}\}]$ nenustatyta. Todėl medianos vertės apskaičiavimas vietoje (37) lygtyje pavaizduoto vidurkio apskaičiavimo nerekomenduojamas, nes medianos skaičiavimas reikalauja didesnių skaičiavimo resursų, tačiau nesuteikia reikšmingos naudos, lyginant su vidurkinimo operacija.

3.3 Skyriaus apibendrinimas

Trečiajame skyriuje aprašytas siūlomo nuotolinio elektros energijos matuoklių paklaidų stebėsenos metodo sistemingosios paklaidos įvertinimo modelis bei jį pasitelkus gauti modeliavimo rezultatai. Modeliavimo tyrimai atlikti naudojantis tipinėmis žemosios įtampos elektros skirstymo tinklo sąlygomis. Taip pat šiame skyriuje aprašyti galios fluktuacijų įtakos nuotolinio elektros energijos matuoklių paklaidų stebėsenos metodui tyrimai.

Metodo tyrimas, modeliuojant jo taikymą tipiniame žemosios įtampos elektros skirstomajame tinkle, atskleidė, kad multiplikatyviojo pataisos koeficiento vertinimo sisteminė paklaida nesiekia 0,26 %, esant įvairių tipų ir lygių apkrovoms (tiesinėms, netiesinėms, reaktyviosioms) TM ar kitose tinklo prijungimo taškuose. Tyrime taikytos tikslinės (tipinės) modeliavimo sąlygos, įskaitant apribojimus, susijusius su tinklo įtampos kritimu, ne didesniu kaip 5 % standartinės 230 V kintamosios įtampos, ir linijų aktyviaisiais nuostoliais, neviršijančiais 5 % perduodamos galios. Kai kuriuose elektros tinklo režimuose net esant didesniai įtampos kritimui ir didesniems galios nuostoliams paklaida neviršijo 0,31 %.

Elektrinės galios profilių vidurkinimo, kuriuo siekiama sumažinti trumpalaikes elektros skirstomojo tinklo fluktuacijas, veiksmingumas buvo tiriamas naudojant realius eksperimentinius galios profilius ir apibendrinamuosius sintezuotus galios profilius. Nustatyta, kad filtruojant galios imtis pagal apibrėžtus kriterijus, gerokai sumažėja gretimų elektrinės galios skirtumų, apskaičiuotų vidutiniškai per tam tikrą iš anksto pasirinktą vidurkinimo intervalą, standartinis nuokrypis. Kadangi papildomos perjungiamos elektrinės apkrovos galia yra apytikriai žinoma iš anksto (~10 W), tai daroma prielaida, kad pasirinktas 20 W filtravimo slenkstis yra tinkamiausias šiam metodui. Nustatyta, kad naudojant duomenų aibės filtravimą, gerokai (25 kartus) sumažėja gretimų elektrinės galios skirtumų standartinis nuokrypis, kas leidžia sumažinti tinkle esančių galios fluktuacijų įtaką.

Taikant gretimų galios imčių, viršijančių 20 W, atmetimo slenkstį ir imčių vidurkinimą 6 min. intervale, eksperimentiniu būdu išmatuotų aktyviosios galios fluktuacijų žemos įtampos skirstomajame tinkle standartinis nuokrypis neviršijo 0,1 W. Naudojant sintezuotus galios profilius, mažesnis nei 0,2 W galios perdavimo sistemos svyravimų standartinis nuokrypis buvo pasiektas po 3 val. galios imčių vidurkinimo.

4 EKSPERIMENTINIS METODO VERIFIKAVIMAS BEI NEAPIBRĖŽTIES ANALIZĖ

4.1 Eksperimentinis PLC G3 sinchronizacijos galimybių tyrimas

Daugelis išmaniųjų energijos matuoklių turi integruotus PLC ryšio modemus, kurie skirti matavimo duomenų nuotoliniam surinkimui. Šiame skyriuje pateikiama kitų mokslininkų netirta preliminarų matuoklių sinchronizavimo analizė, panaudojant PLC G3 ryšio kanalą su SNTP protokolu.

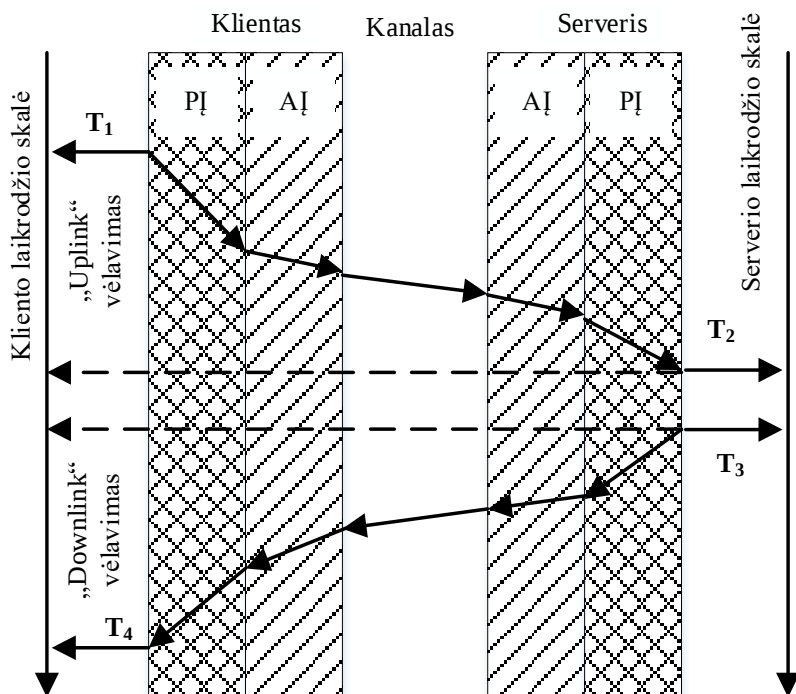
Paprasčiausias laiko sinchronizavimo protokolas gali būti pritaikytas iš TCP/IP SNTP. SNTP protokolo vėlinimas d ir laikrodžio poslinkis t apibrėžti [99]. Taigi toliau yra tiriamas PLC G3 kanalo asinchroniškumas, kuris gali daryti didelę įtaką SNTP protokolo veikimui bei sinchronizacijos tikslumui.

$$d = (T_4 - T_1) - (T_2 - T_3), \quad (36)$$

$$t = \frac{(T_2 - T_1) - (T_3 - T_4)}{2}, \quad (37)$$

čia T_1 yra kliento atsiųsta laiko užklausa (*Originate Timestamp*), T_2 – laiko žymos užklausa, gauta serveryje (*Receive Timestamp*), T_3 – laiko žymos atsakymas, išsiųstas serverio (*Transmit Timestamp*), o T_4 – laiko žymos atsakymas, gautas kliento (*Destination Timestamp*).

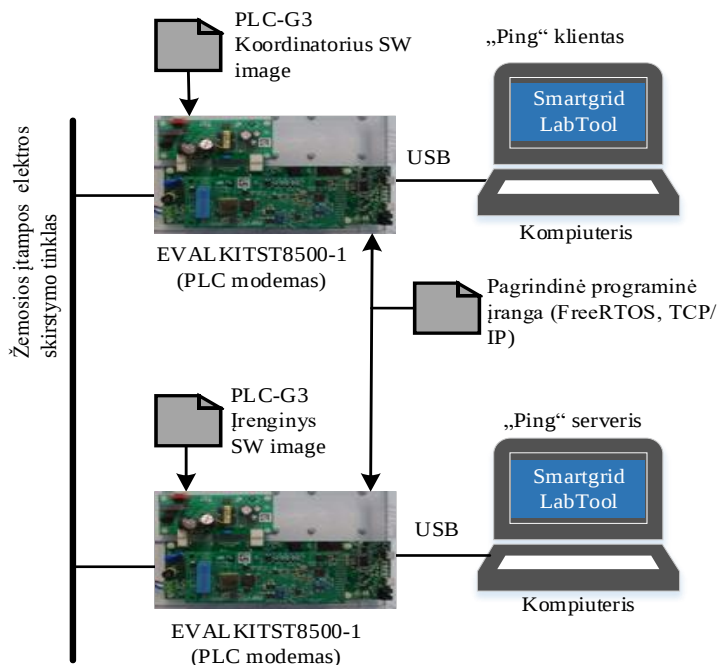
SNTP pranešimo vėlavimas yra vėlavimų suma programinės įrangos paketuose kliento ir serverio, vėlavimai įrangos lygyje bei fiziniame duomenų perdavimo kanale (4.1 pav.). Duomenų paketų gavimo momentas yra laikas, kai pradedamas pranešimas programinės įrangos programos lygmeniu. Atsakymo paketo siuntimo momentas yra laikas, kai aplikacijos sluoksnis siunčia instrukciją į komunikacijų protokolų hierarchinį rinkinį (angl. *stack*) perduoti sugeneruotą duomenų paketą.



4.1 pav. SNTP protokolo operacijų pranešimų siuntimo aukštynkryptis („Uplink“) ir žemynkryptis („Downlink“) programinės įrangos, aparatinės įrangos ir fizinio kanalo įnešami vėlinimai, PI – programinės įrangos sluoksnis, AI – aparatinės įrangos lygmuo

Įprastai SNTP protokolas yra įgyvendinamas UDP/IP protokolo hierarchinio rinkinio viršuje. Tačiau pradiniam testavimui labiau paplitusi yra *ping* procedūra. *Ping* procedūros metu klientas siunčia užklausos pranešimą į serverį ir serveris siunčia aidą atsakymą. Tada klientas gali išmatuoti duomenų siuntimo į abi puses vėlavimą naudodamas vietinį laikrodį, taip galima įvertinti ryšio kanalo asimetriškumą. SNTP protokolo atveju svarbu ne tik kelionės pirmyn ir atgal vėlavimas, bet ir užklausos paketų priėmimo ir atsakymo paketų siuntimo akimirkos. Ši procedūra leidžia paprasčiausiu būdu ištirti PLC ryšio kanalo asimetriškumą.

Laiko sinchronizacijos per PLC kanalą sujungtiems įrenginiams testuoti panaudoti du „ST Microelectronics“ maketai EVALKITST8500-1. Maketai susideda iš ST8500 sistemos mikroschemoje (angl. *System on Chip*) programuojamo elektros linijos ryšio modemo ir pagrindinio procesoriaus „ARM Cortex-M3“, veikiančio 100 MHz dažniu. Į „ST8500 SoC“ modemą įeina realaus laiko modulis (RTE) ir „ARM Cortex-M4F“ šerdis, veikianti iki 200 MHz dažniu. Modemai buvo nustatyti naudoti PLC-G3 protokolą ir CENELEC-A ($3 \div 95$ kHz) dažnių juostą. Vienas modemas buvo nustatyti „Koordinatoriaus“ (vedančiojo) režimu, o antrasis – „Įrenginio“ (vedamojo) režimu (4.2 pav.).



4.2 pav. Eksperimentinė sistema, sudaryta iš dviejų PLC modemų

Maketų pagrindinių procesorių („ARM Cortex-M3“) programinė įranga apima realaus laiko operacinę sistemą „FreeRTOS“ ir „Contiki“ operacinės sistemos adaptuotą TCP/IP protokolų hierarchinį rinkinį. Vartotojas maketų darbą valdo naudodamas „ST Microelectronics Smartgrid LabTool v.4.8.3“ „Windows“ terpės programą. Kompiuteris prie maketo jungiamas per USB sąsają. *Ping* procedūra (ICMP protokolo dalis iš TCP / IP protokolų hierarchinio rinkinio) yra įdiegta koordinatoriaus modulyje ir gali būti paleista naudojant „Smartgrid LabTool“. *Ping* procedūros vėlavimas yra išvedamas „Koordinatoriaus“ terminalo lange ir išsaugomas tekstiniame faile. Tačiau *ping* procedūra praneša tik apie vėlavimą į abi puses ir neišveda pradžios, gavimo, perdavimo ir paskirties laiko žymos, panašios į SNTP (žiūrėti (36)–(37) formules ir 2.7 pav.). Todėl programinė įranga buvo modifikuota taip, kad koordinatorius išvestų laikmačio vertes T_1 ir T_4 , o įrenginio pusėje išvedamos T_2 ir T_3 vertės. Įrenginio pusėje RTOS pranešimas buvo perduotas programinės įrangos lygmeniui kiekvieną kartą, kai *ping* procedūros užklauskos įvykis buvo sugeneruotas naudojant TCP/IP paketą (T_2), o aidas paketas buvo perduotas atgal į TCP/IP paketą (T_3) (4.1 pav.). „Smartgrid LabTool“ sistemai perduoda RTOS programos užduoties pranešimą, pažymimos reikšmės, užfiksuotos T_2 ir T_3 momentais. Sistemos laikmačio skiriamoji geba tiek koordinatoriuje, tiek įrenginyje yra nustatyta 10 ms. Išmatuotos T_1 ir T_4 (koordinatoriaus) bei T_2 ir T_3 (įrenginio) įrašytos į atskirus kompiuterius, o po to sujungtos viename duomenų faile. Sujungti

duomenys apdoroti pasinaudojant „Matlab“ paketu, kuriuo apskaičiuoti vėlavimai ir poslinkiai pagal (39) ir (40) formules.

Duomenų rinkimui buvo panaudoti keli eksperimentinio komunikacijų tinklo nustatymo variantai, pavaizduoti 6 lentelėje.

6 lentelė. PLC ryšio kanalo parametrai naudoti eksperimentų metu

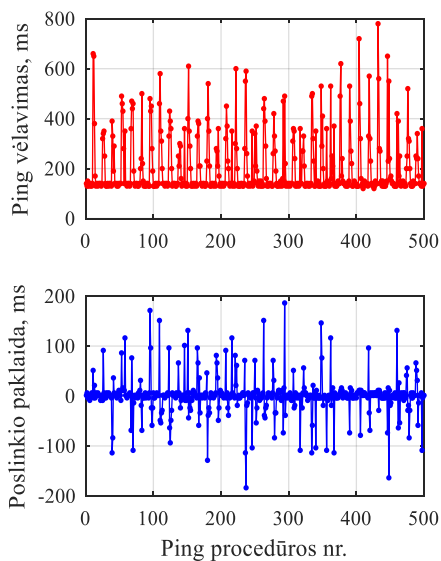
Eksperimentinė sistema	<i>Ping</i> procedūros paketo dydis baitais	Elektros tinklas tarp PLC kliento ir serverio
E1	10	Šalia esančio el. lizdo kompiuteris prijungtas į tą patį el. lizdą.
E2	100	
E3	10	Apie 30 m tarp vedančiojo ir pavaldžiojo 4 stacionarūs kompiuteriai, 1 nešiojamas kompiuteris, 2 ventiliatoriai prijungti tame pačiame tinkle.
E4	100	
E5	10	Vedantysis prijungtas daugiabučio namo rūsyje, o pavaldusis – 3-iaje aukšte.

Tipiškas *ping* vėlavimas parodytas 4.3 pav., virpėjimo ir poslinkio paklaida, įvertinta pagal išraišką:

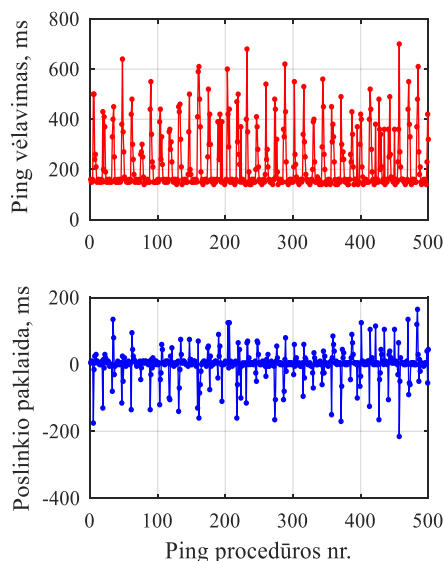
$$\Delta t_i = t_i - \bar{t}, \quad (38)$$

čia $\bar{t}$ yra vidutinis poslinkis, apskaičiuotas pagal $N=1000$ *ping* procedūros operacijų rezultatus.

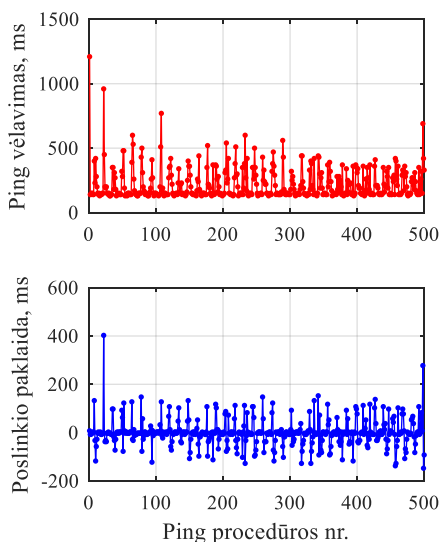
SNTP protokolo tikslumas yra jautrus aukštnykrypčio ryšio (T_2-T_1) ir žemynkrypčio ryšio (T_4-T_3) vėlinimų asimetriškumui. Iš 4.3 pav., 4.4 pav., 4.5 pav. ir 4.6 pav. matyti, kad didesnė poslinkio paklaida stebima, esant didesnėms vėlinimo vertėms. Tą patvirtina ir koreliacija tarp d_i ir $|\Delta t_i|$, $i = \overline{1, N}$ (žr. 7 lent.). Atsižvelgus į tai, kad laiko postūmio paklaida gali būti tiek teigiama, tiek neigiama, rezultatų atvaizdavimui buvo naudojama absoliutinė $|\Delta t_i|$ reikšmė. Visuose eksperimentiniuose duomenyse pastebima reikšminga koreliacija ($p = \sim 0,8$). Todėl daroma išvada, kad padidėjus *ping* procedūros vėlavimui, aukštnykrypčio ryšio ir žemynkrypčio ryšio vėlavimo įnašai nebuvo vienodi ir sukėlė kanalo asimetriją. Kadangi nėra įrodymų, kad fizinis PLC kanalas galėtų sukelti laikiną asimetriją, labiausiai tikėtinas paaiškinimas yra susijęs su kliento ir serverio programinės įrangos paketų vėlinimu dėl RTOS užduočių planavimo bei procesoriaus išteklių valdymo. Remiantis šiuo pastebėjimu, daroma prielaida, kad norint ištirti PLC sistemos potencialą sinchronizuoti laiką tarp tinklo mazgų, pakanka išmatuoti *ping* procedūros vėlinimo virpėjimą.



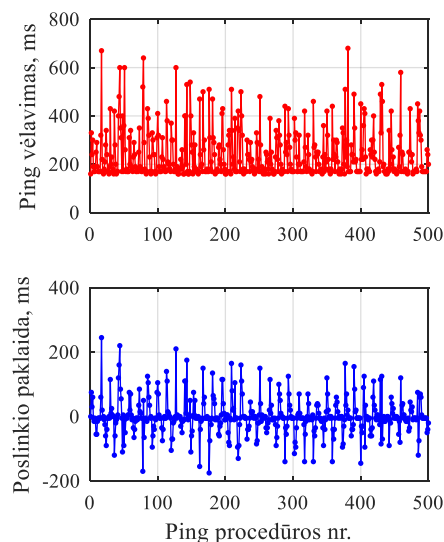
4.3 pav. *Ping* procedūros vėlinimas ir poslinkio paklaida universiteto pastate (naudojant eksperimentinę sistemą E1)



4.4 pav. *Ping* procedūros vėlinimas ir poslinkio paklaida universiteto pastate (naudojant eksperimentinę sistemą E2)



4.5 pav. *Ping* procedūros vėlavimas ir poslinkio paklaida universiteto pastate (naudojant eksperimentinę sistemą E3)



4.6 pav. *Ping* procedūros vėlavimas ir poslinkio paklaida universiteto pastate (naudojant eksperimentinę sistemą E4)

7 lentelė. Ping procedūros duomenų paketų vėlinimas ir SNTP protokolo poslinkio parametrai

Eksperimentinės sąrankos	Vėlavimas, ms			Poslinkio paklaida, ms			Procedūrų kiekis (N)	r
	$\bar{d}$	$\sigma(d)$	$\sigma(\bar{d})$	$\bar{\Delta t}$	$\sigma(\Delta t)$	$\sigma(\bar{\Delta t})$		
E1	202	114	3,6	0,0	41	1,3	1000	0,73
E2	215	111	3,5	0,0	40	1,2	1000	0,76
E3	215	113	3,5	0,0	59	1,8	1000	0,89
E4	239	104	3,3	0,0	55	1,7	1000	0,91
E5	246	144	2,6	-	-	-	2500	-

Ping procedūros duomenų paketų vėlavimų histogramos visais keturiais atvejais (E1–E4, paimtais iš 7 lent.) pavaizduotos pirmajame priede. Iš jų matyti, kad ilgesnio ping paketo perdavimo į abi puses vėlavimo tikimybė yra mažesnė nei trumpesnio vėlavimo. Vidurkis $\bar{d}$, standartinis nuokrypis $\sigma(d)$ ir vidurkio standartinis nuokrypis $\sigma(\bar{d})$ ping vėlinimo pirmyn ir atgal vėlinimas, gauta atlikus kelis eksperimentinius nustatymus, parodytus 6 lent. kartu su atitinkamais statistiniais poslinkio paklaidos parametrais Δt . Padidinus atstumą tarp susisiekančių mazgų ir didinant ping procedūros paketo dydį, vidutinis vėlavimas šiek tiek padidėja.

Kliento laikrodžio sinchronizavimo tikslumas nustatomas pagal jo laikrodžio poslinkio įvertinimo tikslumą serverio laikrodžio atžvilgiu. Kadangi ryšių kanalo asimetrijos įtaka sukelia poslinkio įvertinimo paklaidas, patartina koreguoti kliento laikrodį naudojant vidutinį poslinkį, gautą iš poslinkių įvertinimų grupės. 8 lentelėje pavaizduota standartinio nuokrypio mažėjimas priklausomai nuo poslinkio įverčių kiekio.

8 lentelė. SNTP poslinkio paklaidos statistiniai parametrai priklausomybė nuo matavimų skaičiaus

	E1			E2			E3			E4		
N	$\bar{\Delta t}$, ms	$\sigma(\Delta t)$, ms	$2 \cdot \sigma(\bar{\Delta t})$, ms	$\bar{\Delta t}$, ms	$\sigma(\Delta t)$, ms	$2 \cdot \sigma(\bar{\Delta t})$, ms	$\bar{\Delta t}$, ms	$\sigma(\Delta t)$, ms	$2 \cdot \sigma(\bar{\Delta t})$, ms	$\bar{\Delta t}$, ms	$\sigma(\Delta t)$, ms	$2 \cdot \sigma(\bar{\Delta t})$, ms
50	0,7	26	7,4	-2,9	45	12,8	5,8	70	19,8	10,1	70	19,9
100	3,0	36	7,1	-1,6	39	7,9	3,0	58	11,5	6,4	61	12,3
200	2,2	37	5,2	-2,5	41	5,8	0,98	51	7,2	5,7	60	8,5
500	0,0	38	3,4	-	43	3,9	-1,2	53	4,7	1,2	55	4,9
1000	0,0	41	2,6	0,0	39	2,5	0,0	59	1,8	0,0	55	3,5

Iš gautų rezultatų galima pastebėti, kad realiame tinkle sinchronizavimo tikslumas ne blogesnis negu įtampos fundamentinis periodas, gaunamas atlikus ne mažiau kaip 200 SNTP tipo paketų vėlinimų vidurkinimą.

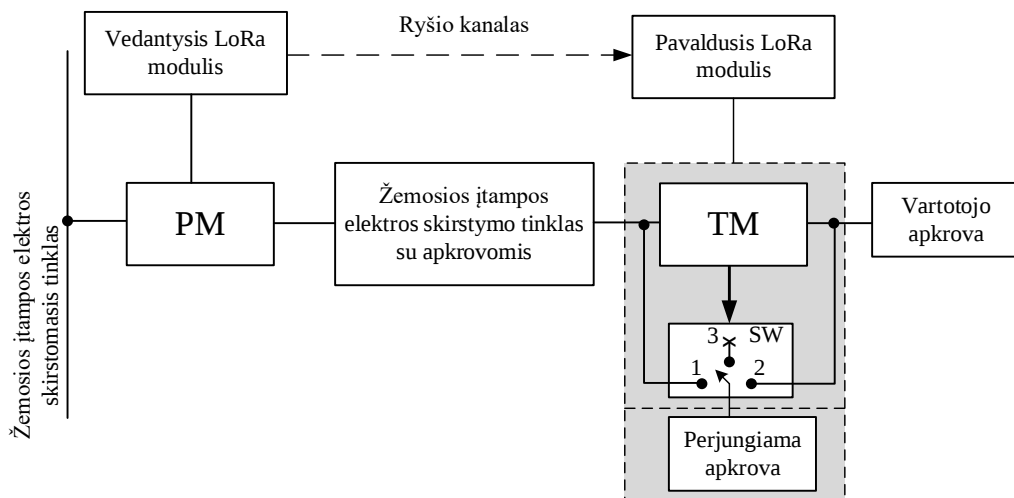
Atlikti PLC „ST Microelectronics“ maketų EVALKITST8500-1, eksperimentiniai ryšio vėlavimo bei ryšio kanalo asimetriškumo tyrimai parodė, kad

Ping procedūros vėlavimai labai išsibarstę ir siekiantys iki 1 sek., bet ir tinklo nesimetriškumas padaro PLC technologiją labai sudėtingai pritaikomą siūlomo nuotolinio EEM paklaidų stebėsenos metodo įgyvendinimui. EEM laikrodžių sinchronizavimas vieno fundamentinio periodo tikslumu, panaudojant SNTP procedūrą NB-PLC G3 protokolo tinkle yra pasiekiamas, tačiau yra reikalingas ženklus laiko intervalas, daugkartiniams sinchronizavimo paketų perdavimams ir išmatuotų vėlinimo įverčių vidurkinimas. Esant prastoms ryšio sąlygoms, atsakymas iš serverio gali būti negaunamas. Atsižvelgiant į skyriuje pateiktus rezultatus, kuriuose matomas didelis kanalo asimetriškumas, ir reikiamos sukurti programinės įrangos kompleksiskumą, buvo nuspręsta paklaidų stebėsenos metodo eksperimentinei aktyviosios galios rodmenų sinchronizacijai naudoti ne NB-PLC ryšio kanalą, o jau kitų autorių ištirtą aplikacijose, kuriose reikalinga duomenų sinchronizacija, bevielio ryšio „LoRa“ technologiją.

4.2 Sistemos prototipo realizavimas

Siekiant eksperimentiškai verifikuoti nuotolinio elektros apskaitos priemonių paklaidų stebėsenos metodo veikimą, buvo atlikti eksperimentiniai matavimai tipiniuose žemosios įtampos elektros skirstomuosiuose tinkluose. Eksperimentiniai tyrimai atlikti privačiame ir daugiabučiame namuose. Eksperimentinė nuotolinės elektros apskaitos priemonių paklaidų stebėsenos sistema sukurta bei suprojektuota, panaudojant sinchronizuotą pamatinę matavimo priemonę. Sistemos įgyvendinimui panaudoti du „ST Microelectronics“ vienfaziai elektros energijos matavimo maketai EVALSTPM32. Vienas iš matuoklių buvo pasirinktas kaip PM, o kitas – kaip TM. Papildoma perjungiamo rezistyvinė apkrova $P_S \sim 10W$, realizuota pasinaudojant aktyviąją varžą, kurios nominalas 4,7 k Ω . Kaip jau buvo minėta praeitame skyriuje, dėl PLC G3 ryšio kanalo asimetriškumo galios matavimų sinchronizacijai atlikti buvo panaudotas bevielis „LoRa“ ryšys. TM valdo papildoma perjungiamo apkrova P_S pagal gautas komandas, kurias naudojantis „LoRa“ bevieliu ryšiu siunčia PM pagal 2.3 pav. pateiktą sekos diagramą. Eksperimentiniai matavimai vykdyti 24 valandas. Naudojamų galios matuoklių maksimalus diskretizavimo dažnis, kaip nurodyta dokumentacijoje [100], yra 5 Hz. Taigi naudojant 0,2 s diskretizavimo periodą, surinktų aktyviosios galios matavimo imčių kiekis yra $(5 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 24) = 432\,000$ imčių. Vieno pataisos koeficiento vertės įvertinimo trukmė yra 6 sekundės. Per parą iš viso įmanoma atlikti $(24 \cdot 60 \cdot 60) / 6 = 14\,400$ atskirų nuotolinių TM pataisos koeficiento įvertinimo operacijų.

Eksperimentiniam nuotolinio paklaidų stebėsenos metodo verifikavimui (pasiekiamo tikslumo ir jį įtakančių faktorių nustatymas) eksperimentiniu būdu tipiniame žemosios įtampos elektros skirstomajame tinkle buvo suprojektuota ir sukurta paskirstytos aktyviosios galios matavimo sistema (4.7 pav.).



4.7 pav. Eksperimentinės sistemos blokinė schema

Eksperimentinė sistema susideda iš dviejų EEM, PM (4.8 pav.) bei TM (4.9 pav.). PM yra įjungtas žemosios įtampos elektros skirstomojo tinklo vietoje, nuo kurios išsišakoja toliau žemosios įtampos skirstomasis tinklas, prie kurio yra prijungtos kitų vartotojų apkrovos bei TM vartotojams. PM ir TM tarpusavyje yra vienas nuo kito fiziškai atskirti per atstumą, kuriame yra žemosios įtampos elektros skirstomasis tinklas su kitomis prie jo prijungtomis apkrovomis. Duomenų sinchronizacijai ir komandų siuntimui tarp matuoklių panaudoti du „LoRa“ ryšio moduliai, vienas iš jų nustatytas vedančiojo režimu, o kitas – vedamojo. Vedančiojo modulio funkcionalumas: siųsti komandas („Komanda 0“, „Komanda 1“, „Komanda 2“, „Komanda 3“) (9 lent.) pavaldžiajam „LoRa“ ryšio moduliui, kuris jas diskretniais portais perduoda TM, kuris pagal gautą komandą perjungia aktyviąją apkrovą P_S (9 lent.). Vedamojo modulio funkcionalumas: priimti vedančiojo modulio išsiųstas komandas ir jas perduoti diskretniais portais TM.

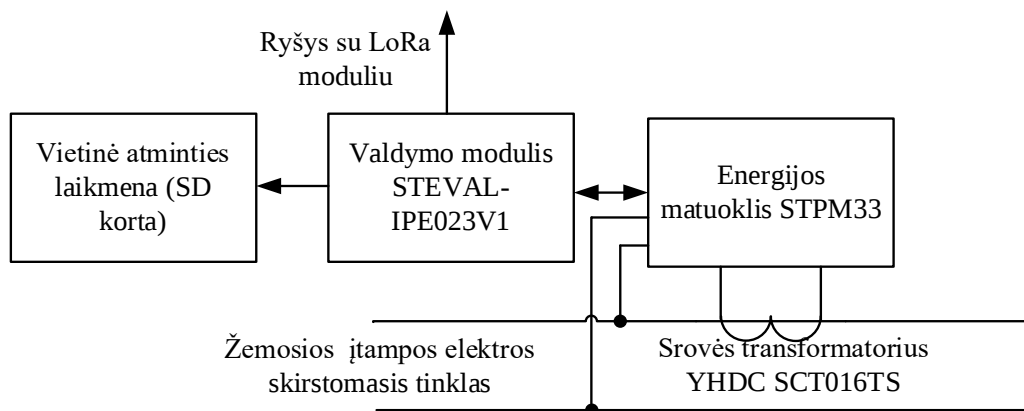
Įjungus modulius pradinė komandą yra „Komanda 0“. Jos metu nėra siunčiami jokia kita komanda bei nėra atliekami jokie galios matavimai, kol nėra gaunamas starto signalas iš vedančiojo modulio. Gavus starto signalą galios paklaidų stebėsenos sistema perjungiamą į darbinį režimą, kurio metu iš vedančiojo modulio paeiliui siunčia komandas („Komanda 1“, „Komanda 2“, „Komanda 3“). TM valdo papildomą apkrovą P_S pagal gautas komandas, iš viso galimos 3 padėties, kurios aprašytos 9 lentelėje.

9 lentelė. Komandos, siunčiamos „LoRa“ ryšio kanalu

Komandos nr.	Jungiklio padėtis	Aprašymas
0	SW3	Papildoma apkrova yra atjungiamas nuo grandinės.
1	SW1	Papildoma apkrova prijungiama priešais TM; tokiu atveju papildomą apkrovą išmatuoja tiksliai PM, o TM jos nemato.
2	SW2	Papildoma apkrova prijungiama už TM; tokiu atveju papildomą apkrovą išmatuoja abu matuokliai.
3	SW3	Papildoma apkrova yra atjungiamas nuo grandinės.

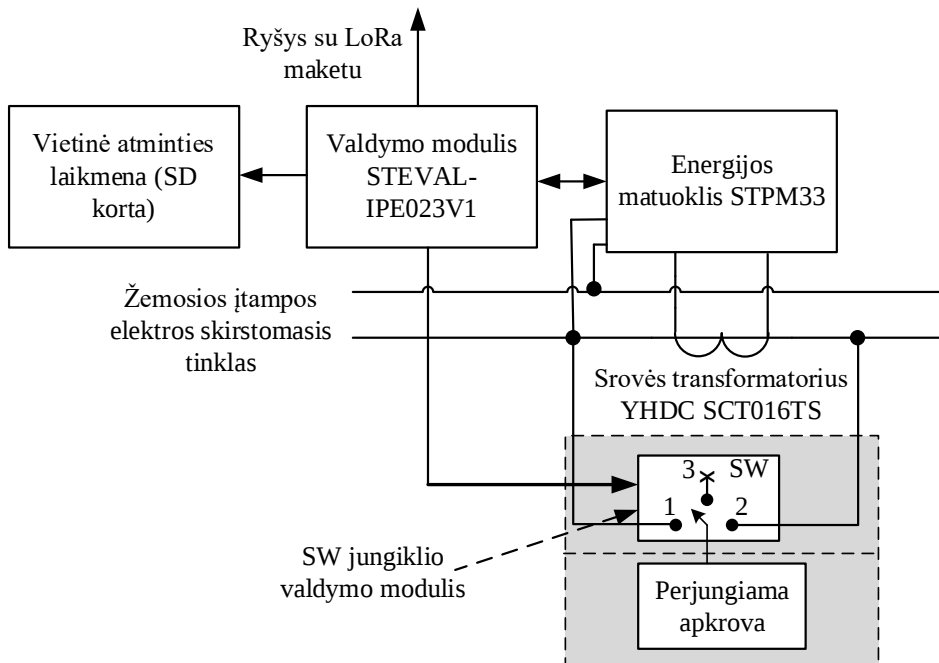
Surinkti duomenys apdorojami asmeniniame kompiuteryje pasinaudojant MATLAB programine įranga.

PM yra sudarytas iš „ST Microelectronics“ maketų: valdymo modulio (STEVAL - IPE023V1) bei EEM (STPM33) (4.8 pav.).



4.8 pav. PM blokinė schema

Galios matavimą atlieką STPM33 EEM, kuris yra prijungiamas prie žemosios įtampos elektros skirstymo tinklo, srovės matavimui naudojamas srovės transformatorius, o įtampai – varžinis daliklis. Valdymo modulis atsakingas už EEM nustatymus, duomenų nuskaitymą bei optinį izoliavimą nuo žemosios įtampos elektros skirstymo tinklo. Duomenų kiekiai atliekant ilgesnius, parą ir ilgiau trunkančius, eksperimentinius matavimus yra gana dideli (10 Mb/parą), kurie niekaip netilptų vidinėje mikrokontrolerio atmintyje. Dėl to nuspręsta duomenis kaupti panaudojant vietinę atminties laikmeną (SD kortelę). TM turi tokį pat valdymo modulį bei galios matuoklį kaip ir PM (4.9 pav.).

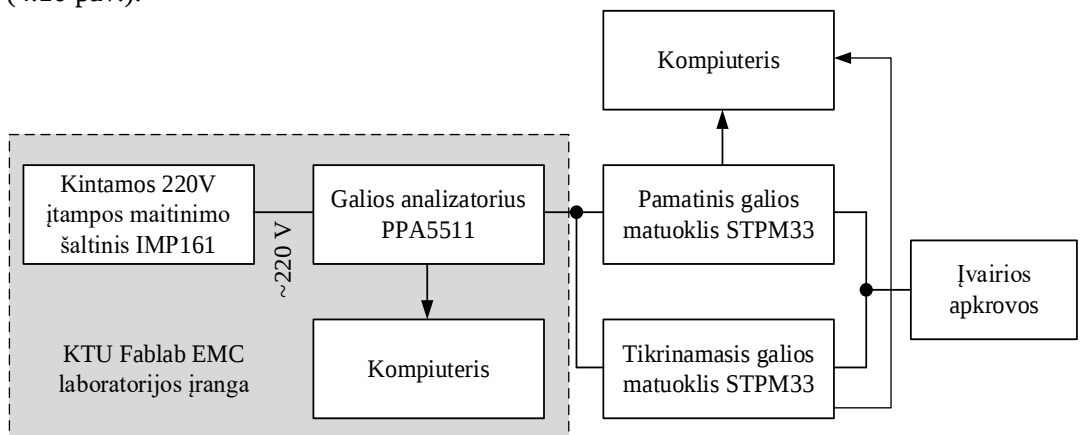


4.9 pav. TM blokinė schema

TM valdymo modulis turi papildomą funkciją. Tai galimybė valdyti papildomą apkrovą P_s pagal gautas komandas iš PM. Duomenys taip pat kaip ir PM atveju išsaugomi vietinėje atminties laikmenoje (SD kortelėje).

4.3 Tikrinamojo elektrinės galios matuoklio paklaidos nustatymas

Siekiant palyginti PM ir TM paklaidas buvo panaudotas bandymų stendas, sudarytas iš kalibruoto kintamos įtampos šaltinio bei kalibruoto galios analizatoriaus (4.10 pav.).



4.10 pav. PM ir TM prototipų galios matavimo paklaidos nustatymo stendo blokinė schema

Stabiliai 220 V tinklo įtampai generuoti buvo naudojamas kalibruotas maitinimo šaltinis N4A06. Matavimo metu 2 STPM33 EEM bei galios analizatorius PPA5511 tuo pačiu metu matavo įvairius suvartojamos aktyviosios galios parametrus prie įvairių dydžių apkrovų (diapazone nuo 20 W iki 2000 W). Šios apkrovos buvo sudedamos iš kelių elektrą vartojančių prietaisų:

- 1) viena 20W kaitrinė apšvietimo lemputė;
- 2) dvi 60W kaitrinės apšvietimo lemputės;
- 3) reguliuojamas 2000 W elektroninis ventiliatorinis šildytuvas.

Duomenų surinkimui EEM buvo prijungti prie asmeninio kompiuterio naudojant UART sąsają. Matavimai atlikti po 15 minučių naudojant 0,2 s diskretizavimo periodą. Per 15 min. surinkti duomenys po to yra vidurkinami ir gaunamos suvidurkintos aktyviosios galios vertės bei paskaičiuojamas suvartojamos aktyviosios galios rodmenų santykis (S) atvaizduoti 10 lentelėje.

10 lentelė. Dviejų matuoklių išmatuotos aktyviosios galios bei galių santykis prie skirtingų aktyvinių apkrovų

Galios analizatoriaus rodmenys, W	PM rodmenys P_{pmvid} , W	TM rodmenys P_{tmvid} , W	Santykis P_{pmvid} / P_{tmvid}
15,34	16,15	16,43	0,983
53,45	58,04	58,99	0,984
71,34	76,49	77,72	0,984
113,54	115,43	116,41	0,985
127,42	133,71	135,53	0,987
488,34	499,45	504,23	0,991
1079,3	1095,31	1105,25	0,993
1732,4	1742,52	1749,52	0,996
Vidutinis			0,988

4.4 Eksperimentinis metodo verifikavimas žemosios įtampos elektros skirstomajame tinkle

4.4.1 Eksperimentinių duomenų aibės

Nuotolinis žemosios įtampos elektros skirstymo tinklų elektros energijos apskaitos prietaisų paklaidų stebėsenos metodas eksperimentiškai buvo tiriamas keliose skirtingose terpėse: privačiame name ir daugiabutyje, iš išmatuotų aktyvios galios sukurtos dvi duomenų aibės, duomenų aibė „SET1“ ir duomenų aibė „SET2“.

Duomenų aibė „SET1“

Pirmoji duomenų aibė „SET1“ eksperimentiškai surinkta privačiame name. Tai 1933 metais statytas 2-jų aukštų gyvenamasis namas, nauja elektros instaliacija įrengta 2010 metais, elektros įvadas – 10 kW galios, tačiau darbai atlikti be projekto ir schemų nėra.

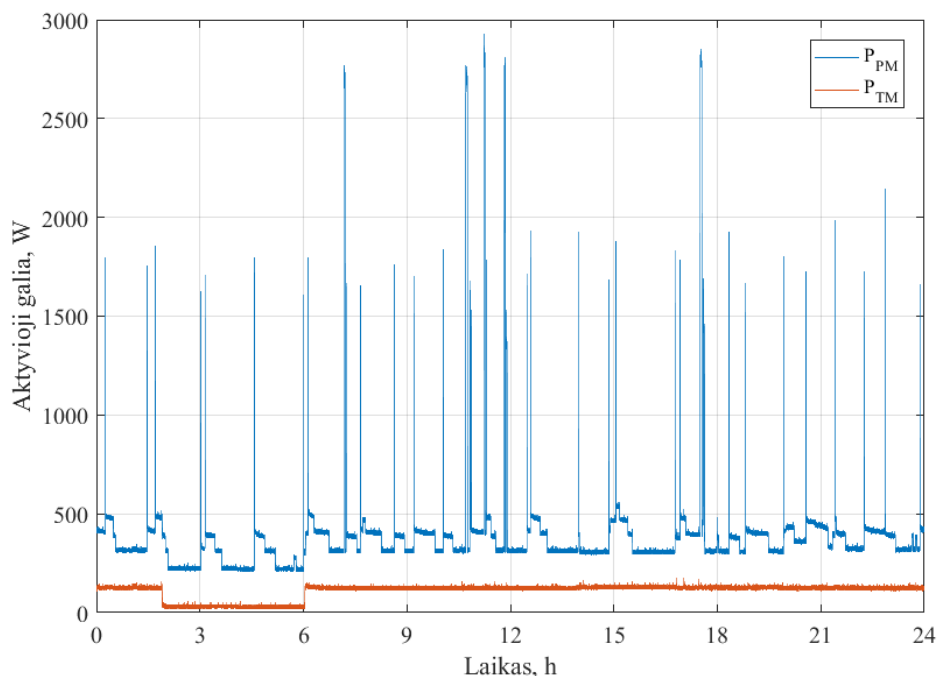
Privatus namas pasirinktas dėl to, kad galima aiškiai žinoti, kokios apkrovos yra įjungtos visame žemosios įtampos elektros skirstomajame tinkle. Taip pat įjungtų prietaisų skaičius nebus toks didelis, kaip, pavyzdžiui, daugiabučio pastato atveju, kas lemia mažesnes galios fluktuacijas tinkle, taip sudarant geriausias sąlygas metodo

veikimui. Taip pat eksperimentiškai surinkti duomenys yra išmatuoti realiaame žemosios įtampos elektros skirstomajame tinkle, o ne laboratorijoje sujungtame dirbtiniame tinkle (pavyzdžiui, elektros tinkle, surinktame iš ilgintuvų). Eksperimento metu elektros energijos vartojimas buvo įprastinis, tai yra, eksperimento metu apkrovos nebuvo specialiai perjunginėjamos ar išjungiamos norint dirbtinai sumažinti galios fluktuacijas. Eksperimentas buvo atliekamas ant vienos iš 3-jų elektros fazių, prie kurios prijungtas PM. Šis matuoklis apima visą pirmą privataus namo aukštą, kuriame yra virtuvė, vonios kambarys, miegamasis ir svetainė. Tuo tarpu TM buvo prijungtas miegamajame kambaryje. Prijungtų prietaisų prie kiekvieno iš matuoklių sąrašas pateiktas 11 lentelėje.

11 lentelė. Prijungtų prietaisų prie EEM sąrašas

Matuoklis	Prijungti prietaisai
PM	Virtuvė: mikrobangų krosnelė, elektrinis virdulys, šaldytuvas, elektrinis gartraukis, elektrinė orkaitė. Miegamasis: LCD televizorius, stalinė kaitrinė lempa, 15 W USB kroviklis, modemas. Svetainė: televizorius, muzikinis centras. Vonios kambarys: skalbimo mašina.
TM	Miegamasis: LCD televizorius, stalinė kaitrinė lempa, 15 W USB kroviklis, modemas.

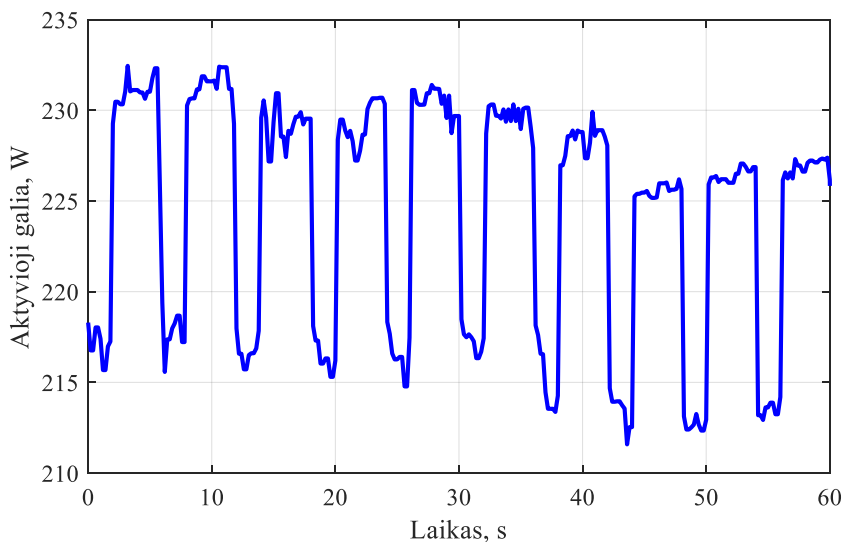
Per parą privačiame name išmatuoti PM ir TM aktyviosios galios rodmenys atvaizduoti 4.11 paveiksle.



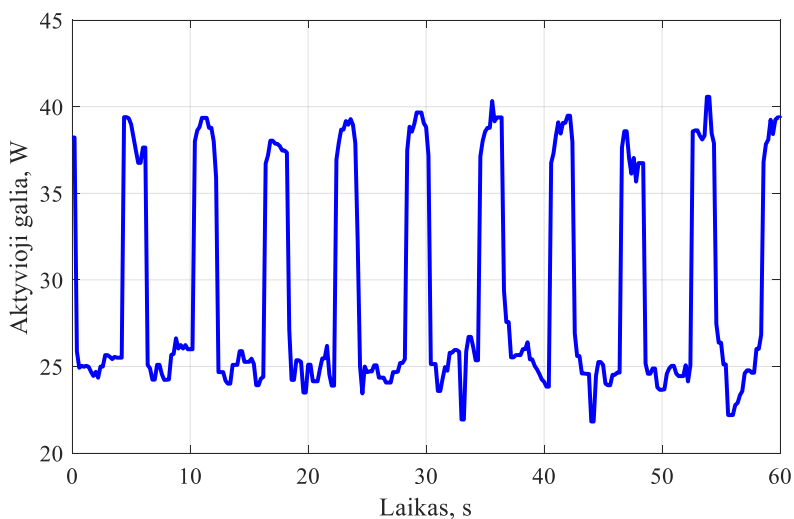
4.11 pav. Per 24 valandas PM bei TM išmatuoti suvartojamos aktyviosios galios profiliai nuosavame name

Nors eksperimentinė duomenų bazė „SET1“ surinkta tik vieno privataus namo ribose, suvartojamos galios profilyje pasitaikė gana daug šuolių nuo ~1 kW iki 2,5 kW. Juos nulemia įvairūs didesnės galios virtuvės elektriniai įrenginiai tokie kaip: elektrinis virdulys, šaldytuvas, mikrobangų krosnelė ir kita. Iš išmatuoto aktyviosios galios profilio išskiriami momentiniai pusantros valandos periode pasitaikantys trumpi (~0,5 s) aktyviosios galios šuoliai (~1,8 kW). Šie suvartojamos aktyviosios galios šuoliai tipiniai šaldytuvo išjungimo metu atsirandantiems aktyviosios galios šuoliams [101].

Dėl to, kad paimtas ilgas 24 valandų intervalas, grafike nesimato, kaip yra junginėjama papildoma 10 W apkrova. Dėl to 1 minutės aktyviosios galios PM ir TM profiliai pavaizduoti (4.12 pav.) ir (4.13 pav.).



4.12 pav. PM išmatuotas aktyviosios galios profilio fragmentas (matoma perjunginėjama apkrova P_S)

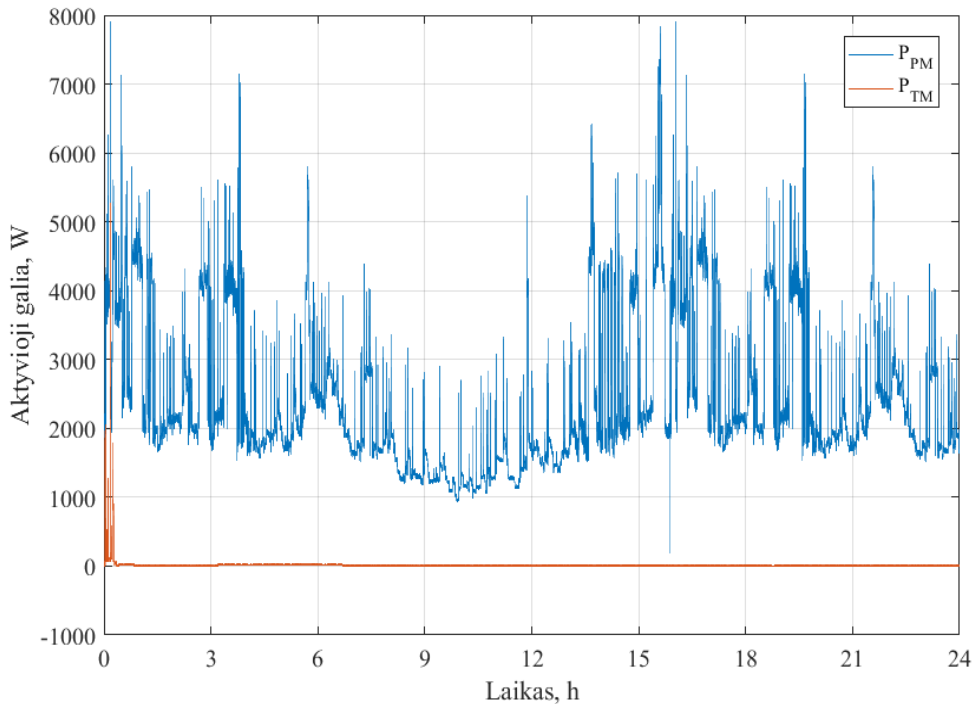


4.13 pav. TM išmatuotas aktyviosios galios profilio fragmentas (matoma perjunginėjama apkrova P_S)

Duomenų aibė „SET2“

Duomenų aibė „SET2“ buvo surinkta 1973 m. statybos daugiabučiame 5 aukštų pastate, kuriame vieno buto galios įvadas yra 6 kW. PM buvo prijungtas prie vienfazio tinklo įvado, per kurį elektros energija tiekama 10-iai butų (vartotojų). TM buvo prijungtas viename iš šių butų. Duomenų aibės „SET2“ aktyviosios galios profilis pavaizduotas 4.14 pav. Jis atspindi tipinį elektros energijos vartojimą per parą išeiginę dieną. TM prijungimo vietoje eksperimento pradžioje buvo komutuojami įprastiniai

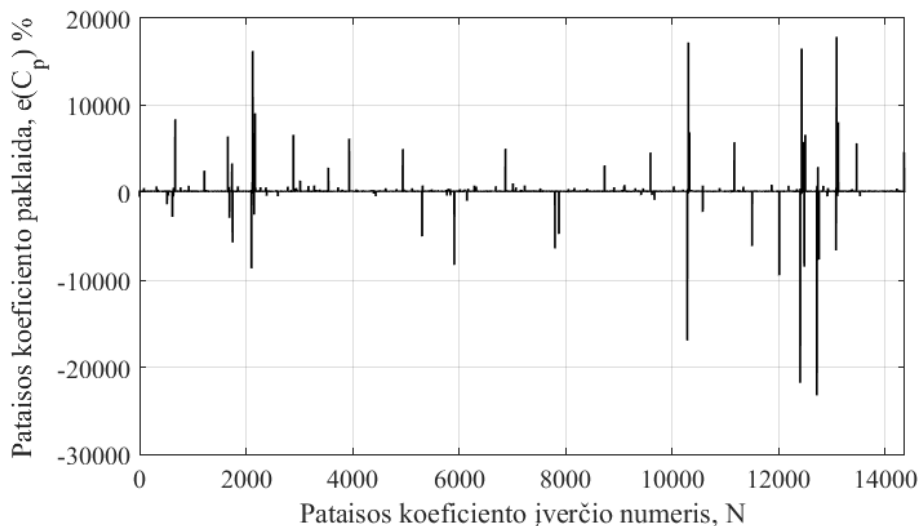
buitiniai elektros energijos prietaisai, o viso eksperimento metu buvo vartojama apie 10 W galia (kaitrinė lemputė).



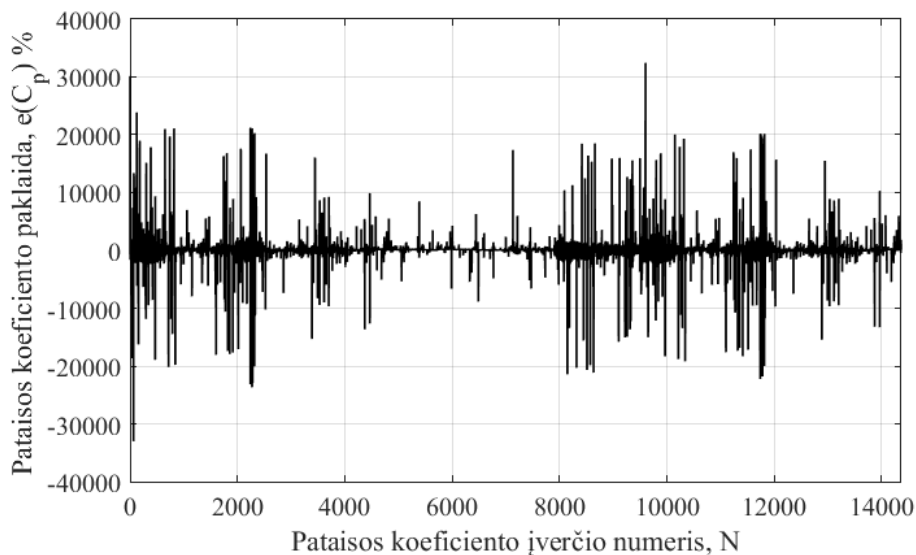
4.14 pav. Per 24 valandas PM bei TM išmatuoti aktyviosios galios profiliai daugiabučiame name

4.4.2 Tikrinamojo matuoklio pataisos koeficiento įvertinimas

Pagal (11) formulę paskaičiuoti aktyviosios galios pataisos koeficientai ir po to apskaičiuotos pataisos koeficiento įvertinimo paklaidos pagal (31) formulę (tikrąja pataisos koeficiento verte laikyta $C_p^* = 0,988$, paimta iš 10 lent. apskaičiuotos vidutinės vertės) gauti rezultatai pavaizduoti naudojant aibių „SET1“ (4.15 pav.) ir „SET2“ (4.16 pav.) duomenis.



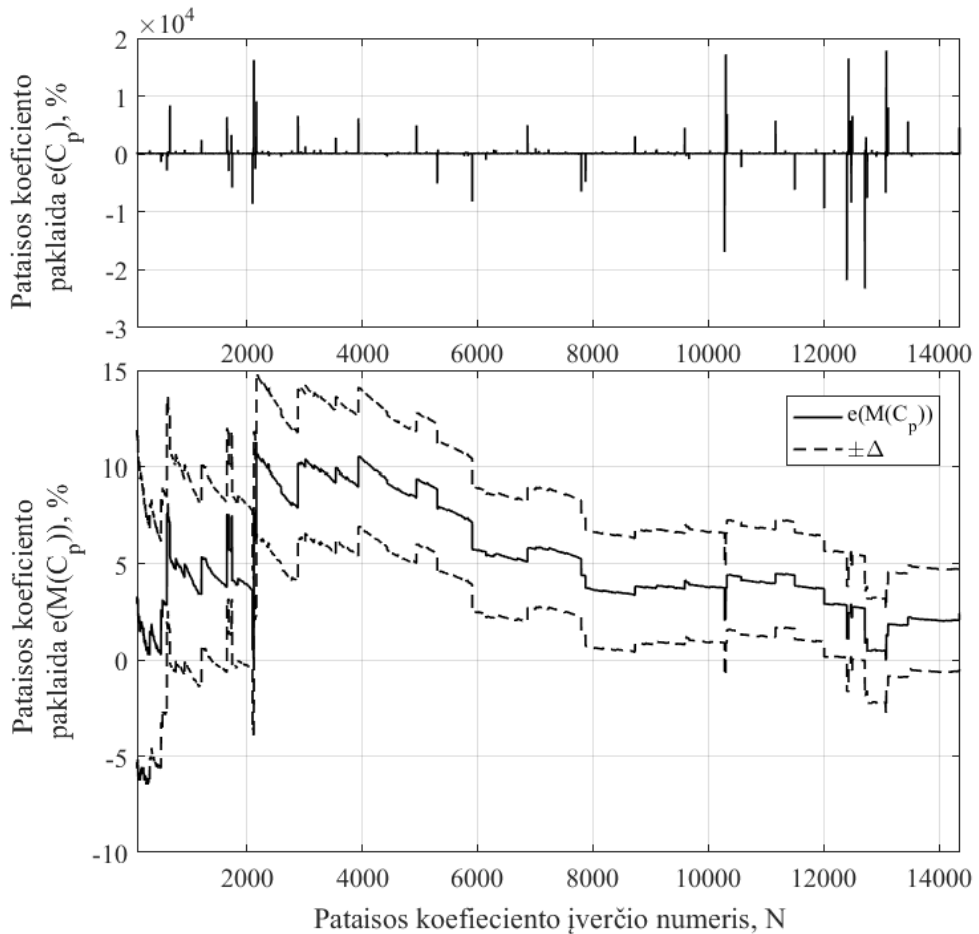
4.15 pav. Aktyviosios galios pataisos koeficientų įverčiai, gauti naudojant duomenų aibę „SET1“



4.16 pav. Aktyviosios galios pataisos koeficientų įverčiai, gauti naudojant duomenų aibę „SET2“

Paskaičiavus pataisos koeficientus matyti, kad yra atveju, kai vienetinio pataisos koeficiento vertė viršija 5000 %: duomenų aibės „SET1“ atveju 28 kartai ((28 / 14400)*100 % = 0,2 % visų koeficientų), o duomenų aibės „SET2“ atveju 256 kartai ((256 / 14400)*100 % = 1,8 % visų koeficientų). Tai proporcingai atitinka prieš tai gautus rezultatus privačiame name, kuriame yra vienas butas, o daugiabutyje jų 10. Taip įvyksta dėl to, kad duomenų aibės „SET2“ elektros tinkle dėl didesnio kiekio

elektros galią vartojančių prietaisų bei klientų veiklos aktyviosios galios fluktuacijos yra didesnės. Įjungiant ar išjungiant galingą elektros prietaisą (pvz.: el. virdulį, šaldytuvą ir kt.) aktyvioji galia greitai ir stipriai ($1 \div 2$ kW) išauga. Jei šie dideli aktyviosios galios šuoliai įvyksta pataisos koeficiento įvertinimo metu, tuo metu nebegalioja viena esminių metodo prielaidų. Esminė prielaida – pataisos koeficiento vertinimo metu visos apkrovos turi būti kiek įmanoma stabilios. Dėl šių suvartojamos aktyviosios galios šuolių pataisos koeficiento įverčių reikšmės gaunamos labai nutolusios nuo tikrosios vertės (4.17 pav.).

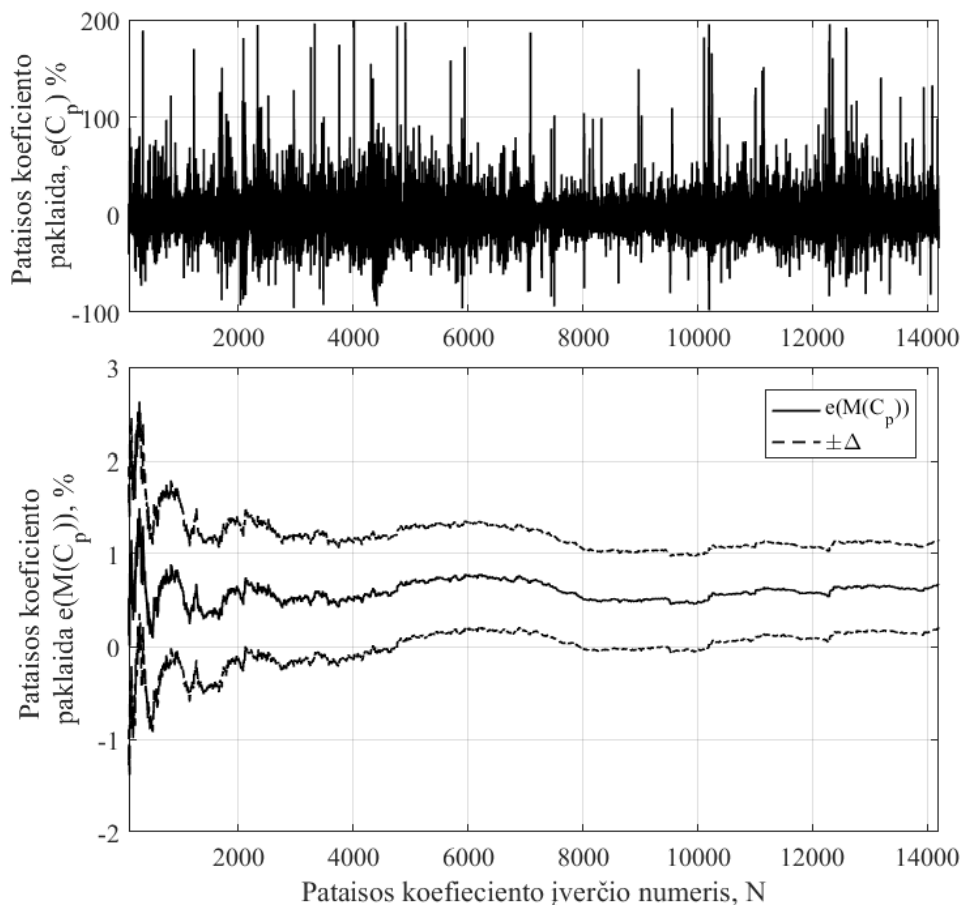


4.17 pav. Pataisos koeficientų įverčių seka (viršutinis pav.) ir pataisos koeficiento vidurkio paklaidos priklausomybė nuo vidurkinamų įverčių skaičiaus (apatinis pav.).
Naudojama duomenų aibė „SET1“

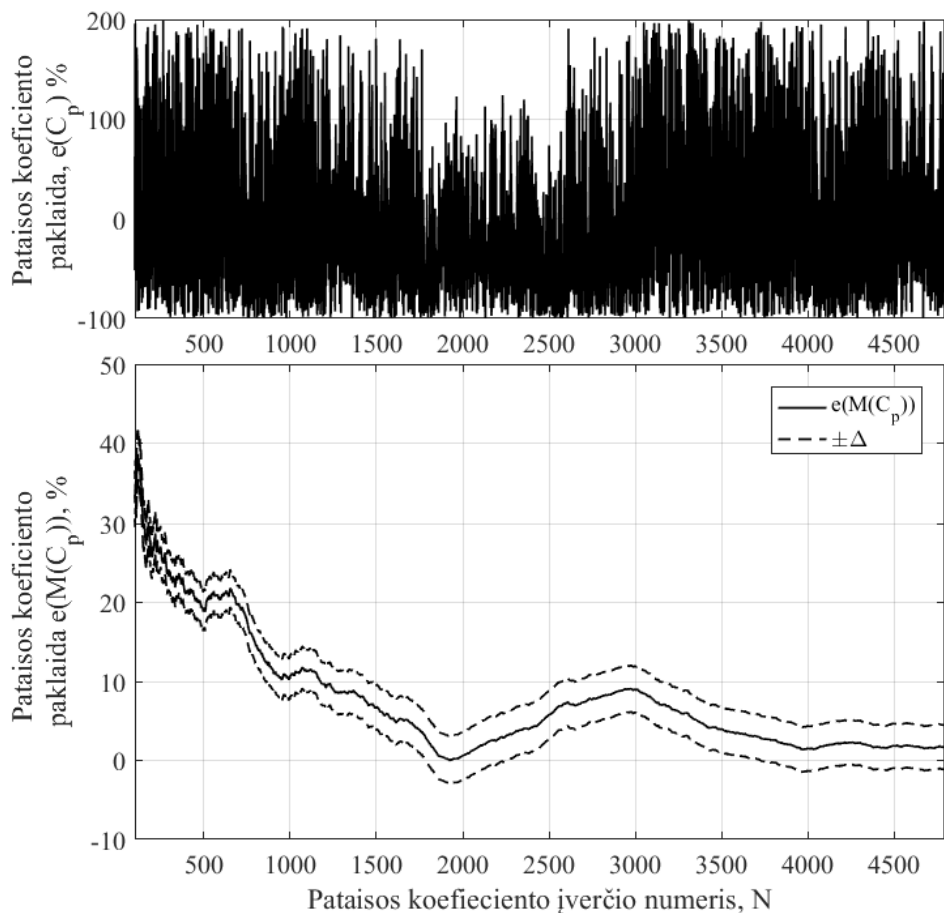
Pataisos koeficiento vidurkio reikšmių ruožas su tikimybe 95 % apibūdinamas

$$\pm \Delta = e \left(M(C_p) \right) \pm 2\delta \left(e \left(M(C_p) \right) \right). \quad (39)$$

Naudojant visas pataisos koeficiento reikšmes pataisos koeficiento reikšmė nesustoja kisti net ir po 24 valandų eksperimentinių duomenų vidurkinimo. Toks ilgas laiko intervalas yra nepatrauklus realizuojant nuotolinį EEM paklaidų stebėsenos metodą realiomis sąlygomis. Dėl to siūloma taikyti duomenų aibės filtravimą, pagal kurį nufiltruojami labai didelės paklaidos matavimai (t. y. pataisos koeficientų vertės, kurios netenkina sąlygų $0 < C_p$ arba $C_p < 3$). Pritaikius šią sąlygą išfiltravus įvertintų pataisos koeficientų aibę gaunami rezultatai pavaizduoti naudojant duomenų aibės „SET1“ (4.18 pav.) ir „SET2“ (4.19 pav.).



4.18 pav. Pataisos koeficientų įverčių seka (viršutinis pav.) ir pataisos koeficiento vidurkio paklaidos priklausomybė nuo vidurkinamų įverčių skaičiaus (apatinis pav.), pritaikius duomenų aibės filtravimą. Naudojama duomenų aibė „SET1“

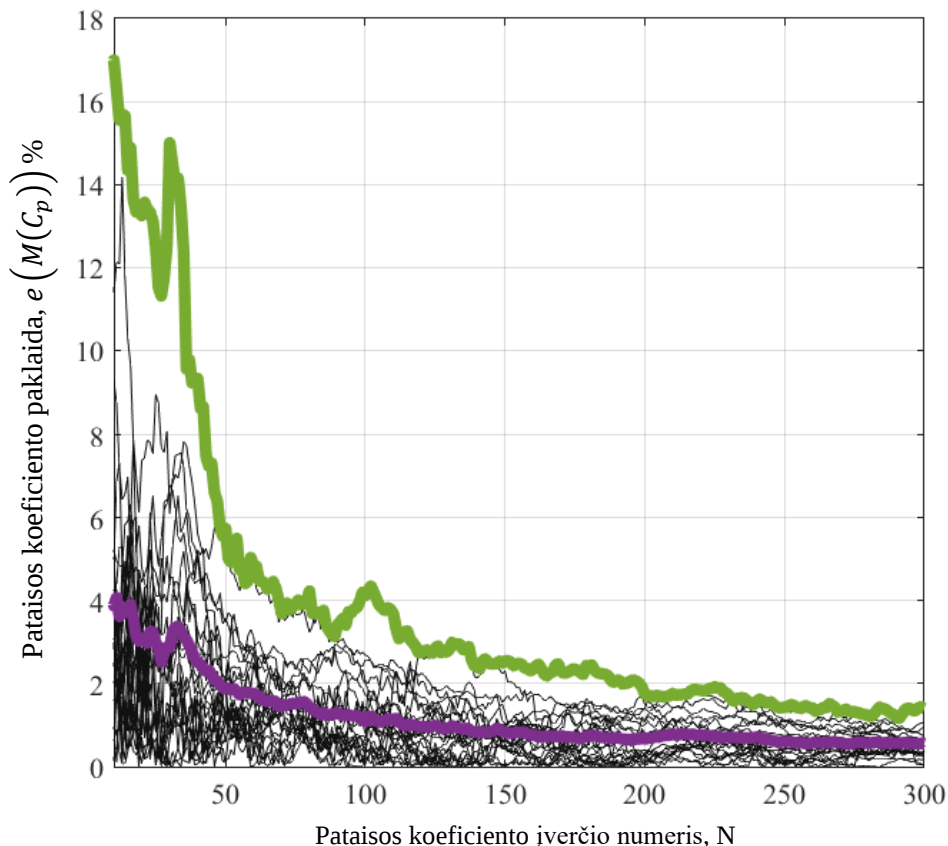


4.19 pav. Pataisos koeficientų įverčių seka (viršutinis pav.) ir pataisos koeficiento paklaidos priklausomybė nuo vidurkinamų įverčių skaičiaus (apatinis pav.), pritaikius duomenų aibės filtravimą. Naudojama duomenų aibė „SET2“

Duomenų aibės „SET2“ po 24 val. vidurkinimo pataisos koeficiento paklaida sumažėja iki 2 %. Atrinkus visus pataisos koeficientus pasinaudojant prieš tai pristatytą duomenų aibės filtravimo sąlyga matoma, kad buvo atmesta $(9571 / 14400) = 66 \%$ visų per parą atliktų operacijų, tai reiškia, kad tik 34 % visų pataisos koeficiento įvertinimo operacijų buvo naudingos. Dėl tokio mažo naudingumo koeficiento šio metodo ekonomiškai neapsimoka taikyti visą parą, ir jeigu žemosios įtampos elektros skirstymo tinkle yra daug elektros vartotojų, vertėtų palaukti, kol vartotojų aktyvumas yra sumažėjęs (pavyzdžiui, nakties metu, kai žmonės miega) iki atitinkamos vertės ir tik tada naudoti siūlomą nuotolinę TM paklaidos stebėsenos metodą.

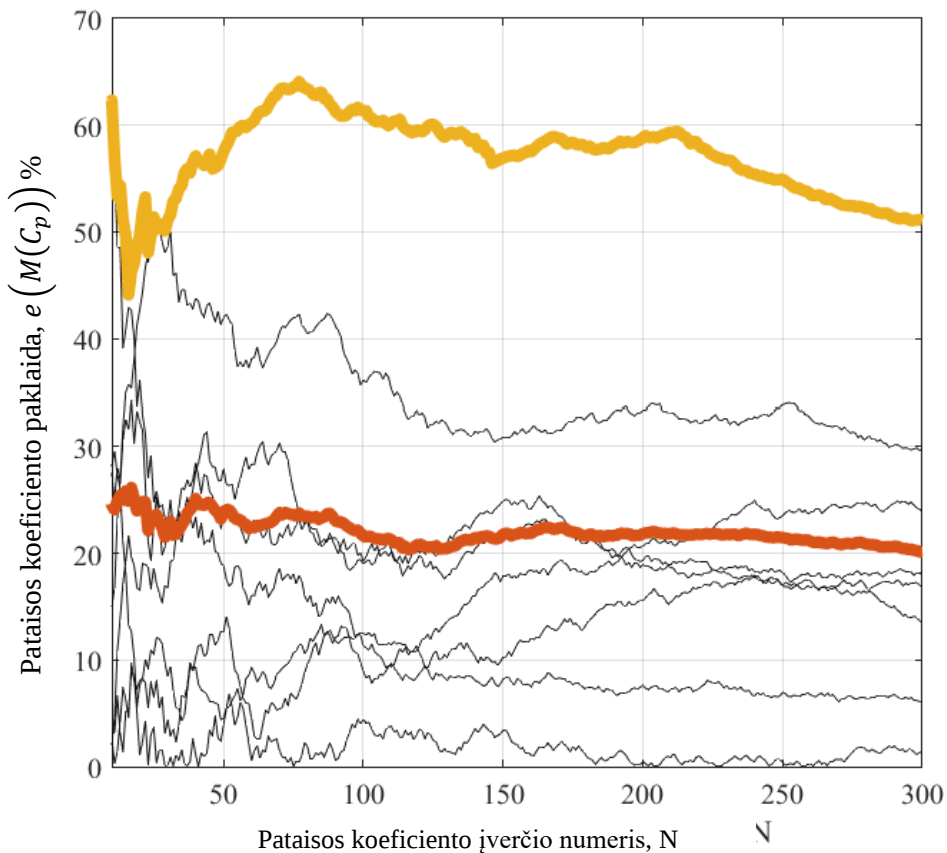
Duomenų aibė „SET1“ buvo sukarpyta į 48 intervalus po 30 min., o „SET2“ į 8-is intervalus po 180 min. Su kiekvienu aktyvios galios profiliu paskaičiuota pataisos koeficiento paklaidos priklausomybė nuo įverčių kiekio. Naudojant duomenų aibę

„SET1“ gauti rezultatai pavaizduoti 4.20 pav., o naudojant duomenų aibę „SET2“ – 4.21 pav.



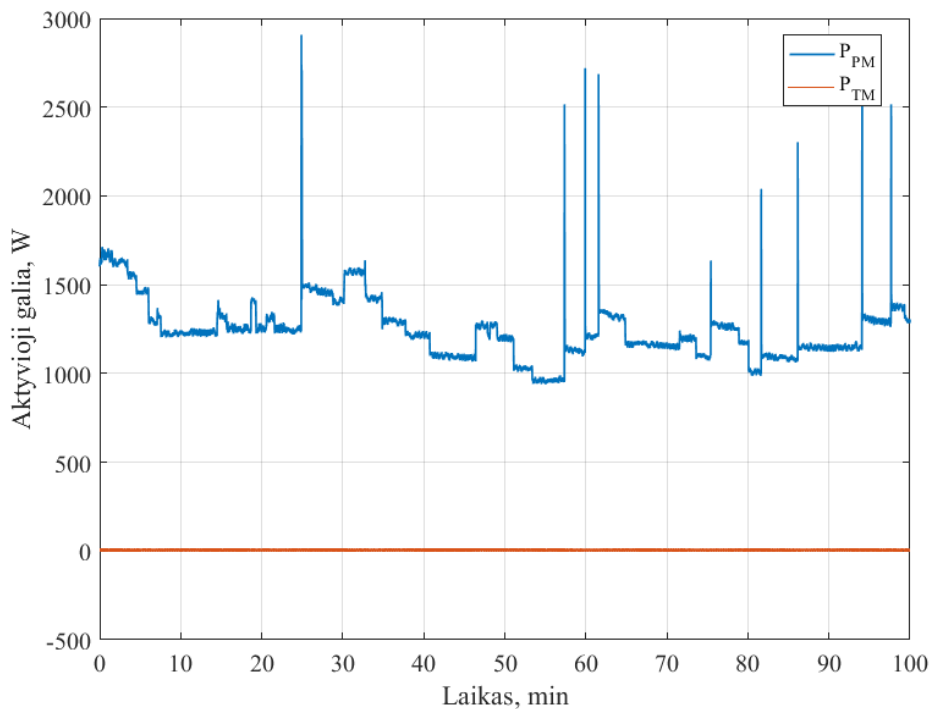
4.20 pav. Pataisos koeficientų paklaidos, apskaičiuotos naudojant atskirus 30 min. duomenų intervalus iš duomenų aibės „SET1“ (vidutinės bei maksimalios vertės paryškintos)

Paskaičiavus visų 48 aktyviosios galios profilių pataisos koeficientų paklaidas bei jų vidurkį, matyti, kad vidutiniškai pataisos koeficiento paklaidos reikšmė gaunama $< 1 \%$, o maksimali pasiekta 2% . Taigi, tais atvejais, kai suvartojama aktyvioji galia yra sąlyginai nedidelė (iki 1 kW , kaip yra duomenų aibės „SET1“ atveju) galima daryti prielaidą, kad ir elektros galią vartojančių prietaisų kiekis yra nedidelis. Nedidelis elektros galią vartojančių prietaisų kiekis reiškia, kad aktyvios galios šuolių, kurie iškraipytų pataisos koeficiento įvertinimą, kiekis bus mažesnis, kaip ir yra duomenų aibės „SET1“ atveju. Tuomet galima reikšmingai sutrumpinti TM paklaidos įvertinimo procedūros trukmę.

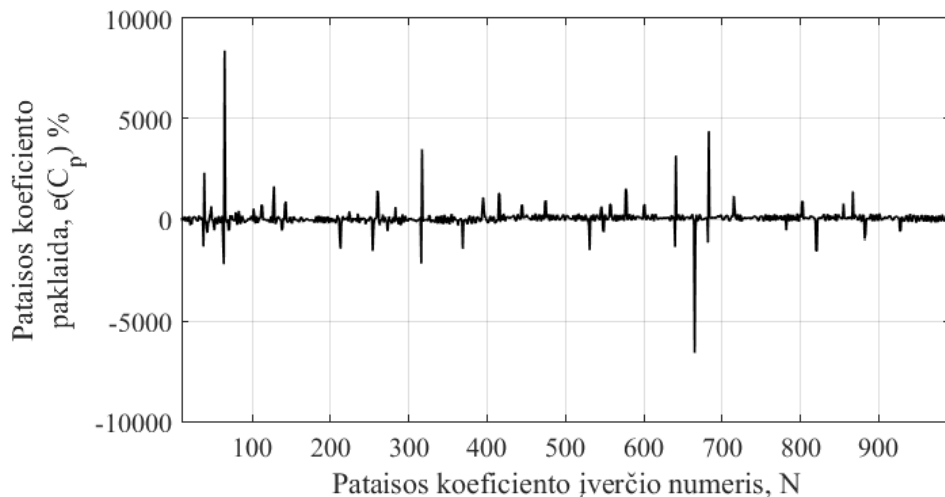


4.21 pav. Pataisos koeficiento paklaidos, apskaičiuotos naudojant atskirus 180 min. duomenų intervalus iš duomenų aibės „SET2“ (vidutinės bei maksimalios vertės paryškintos)

Tačiau duomenų aibės „SET2“ atveju, kai suvartojama galia elektros tinkle kinta gana dažnai (didesnis aktyviąją galią vartojančių prietaisų skaičius), didelis pataisos koeficientų įverčių kiekis yra nufiltruojamas naudojant duomenų aibės filtravimą. Vis dėlto iš duomenų aibės „SET2“ pavyksta atrinkti atskirą aktyviosios galios suvartojimo tinkle intervalą, kuriame galios suvartojimas yra sąlyginai stabilus. Tai matyti, parinkus 100 min. intervalą (parinktas iš 4.14 pav. nuo 9 val.) aktyviosios galios profilyje, pavaizduotame 4.22 pav., bei paskaičiavus pataisos koeficientus (žr. 4.23 pav.).

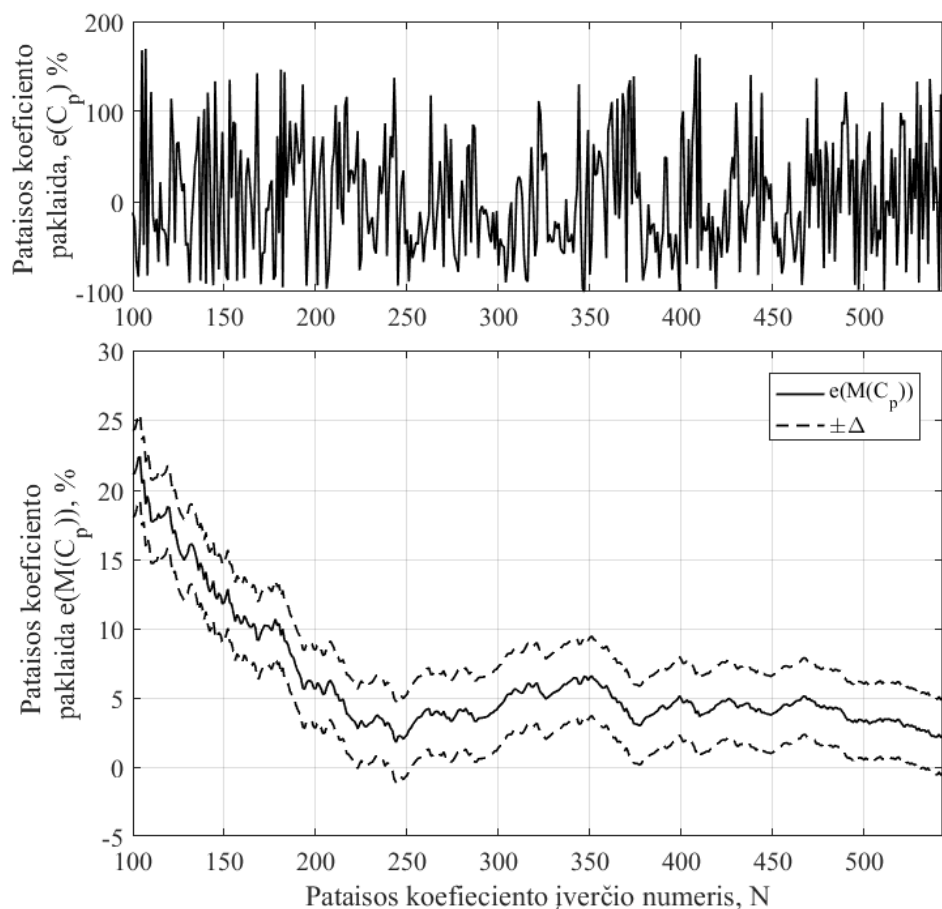


4.22 pav. 100 min. suvartojamos aktyviosios galios fragmentas iš duomenų aibės „SET2“



4.23 pav. Pataisos koeficientų vertės 100 min. intervale iš duomenų aibės „SET2“

Pritaikius duomenų aibės filtravimo sąlygą, paskaičiuoti pataisos koeficientų įvertiniai bei pataisos koeficiento paklaidų vidurkių kitimas pavaizduoti 4.24 pav.



4.24 pav. Pataisos koeficiento verčių kitimas (viršutinis pav.) ir jų paklaidos vidurkio bei pasikliovimo intervalo kitimas, atliekant įverčių vidurkinimą (apatinis pav.) iš 100 min. intervalo paimto iš duomenų aibės „SET2“

Duomenų aibės „SET2“ po 1 valandos vidurkinimo pataisos koeficiento paklaida pasiekta 2,2 %. Atrinkus visus pataisos koeficientus pasinaudojant prieš tai pristatytą duomenų aibės filtravimą nufiltruotų pataisos koeficientų kiekiai iš įvairių duomenų aibių pavaizduoti 12 lentelėje.

12 lentelė. Filtravimo metu atmestų pataisos koeficiento įverčių kiekis iš įvairių duomenų aibių

Duomenų aibė	Apskaičiuotų pataisos koeficientų skaičius	Atmestų pataisos koef. kiekis	Atmestų pataisos koef. kiekis, %	Naudingų duomenų kiekis, %
SET1	14400	163	1,1	98,9
SET2	14400	9571	66,5	33,5
Intervalas iš SET2	1000	453	45,3	54,7

Taip pat buvo atlikta išsamesnė duomenų aibės filtravimo lygio nustatymo analizė. Duomenų filtravimas ištirtas prie keturių skirtingai apibrėžtų parametų atvejų (40)–(43) sąlygomis.

$$\frac{(C_t - C_{p(a)})}{C_{p(a)}} \cdot 100\% = e_{cp(1)}, \quad (40)$$

$$\left(\frac{C_t - C_{p(a)}}{C_t} \right) \cdot 100\% = e_{cp(2)}, \quad (41)$$

$$\left(\frac{C_t - C_{p(m)}}{C_{p(m)}} \right) \cdot 100\% = e_{cp(3)}, \quad (42)$$

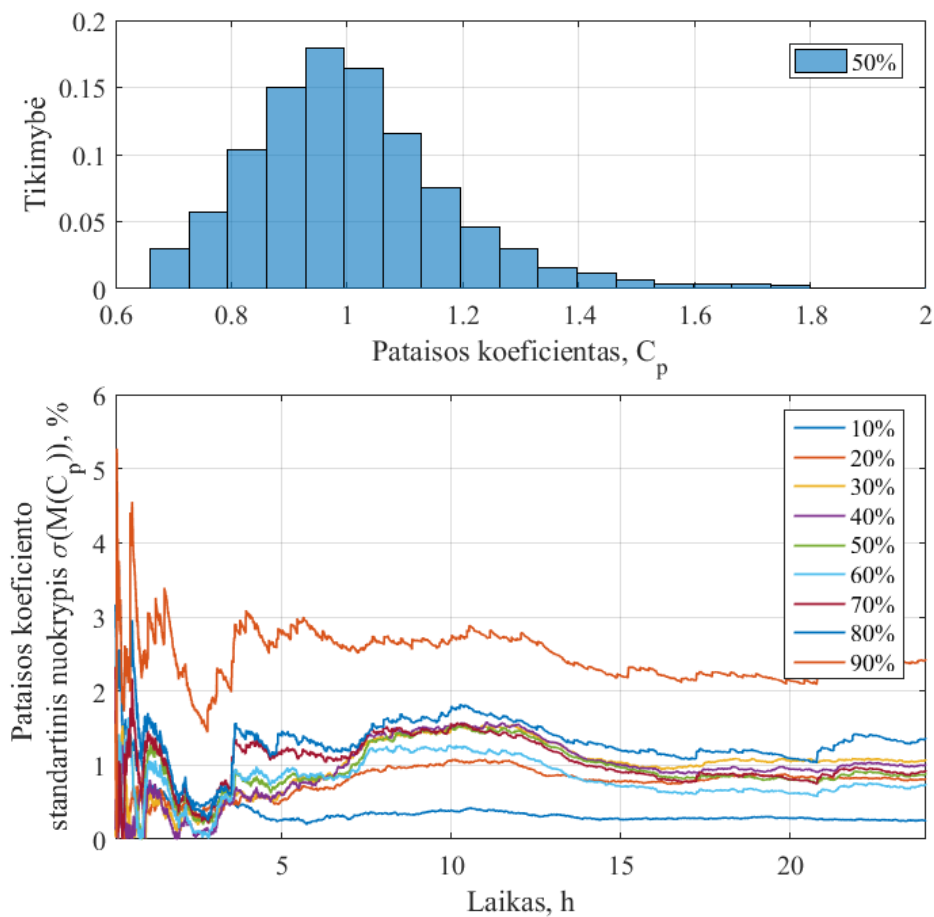
$$\left(\frac{C_t - C_{p(m)}}{C_t} \right) \cdot 100\% = e_{cp(4)}, \quad (43)$$

čia C_t – tikroji pataisos koeficiento reikšmė paimta iš 10 lent. $C_t = 0,988$, $C_{p(a)}$ eksperimentiškai išmatuota ir suvidurkinta pataisos koeficiento reikšmė, $C_{p(m)}$ eksperimentiškai išmatuota ir paskaičiuota medianos reikšmė. (40)–(43) aprašytos keturios duomenų aibės filtravimo sąlygos yra dvi, kai pataisos koeficientas apskaičiuojamas naudojant vidurkinimą (40) – filtruojama santykinė pataisos koeficiento vertė, (41) – filtruojama absoliuti pataisos koeficiento vertė. Tokiu pat principu dvi filtravimo sąlygos skirtos įvertinti pataisos koeficiento reikšmę taikant medianą (42) – filtruojama santykinė pataisos koeficiento vertė, (43) – filtruojama absoliuti pataisos koeficiento vertė. Duomenų aibės filtravimo sąlyga:

$$e_{cp(n)} > R_a, \quad (44)$$

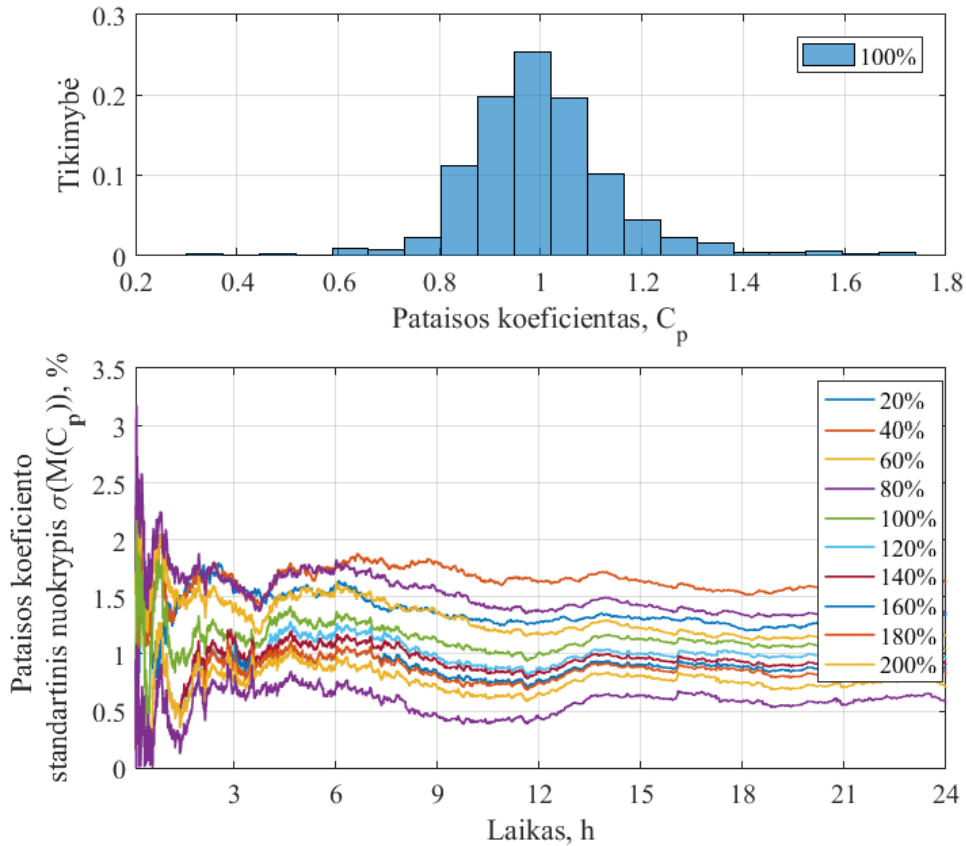
čia R_a – duomenų aibės filtro filtravimo lygis procentais.

Pataisos koeficientų, įvertintų pagal (40) išraišką, verčių histograma ($R_a = 50\%$) ir vidurkio standartinio nuokrypio priklausomybė nuo R_a ir vidurkinimo laiko pavaizduota 4.25 pav.



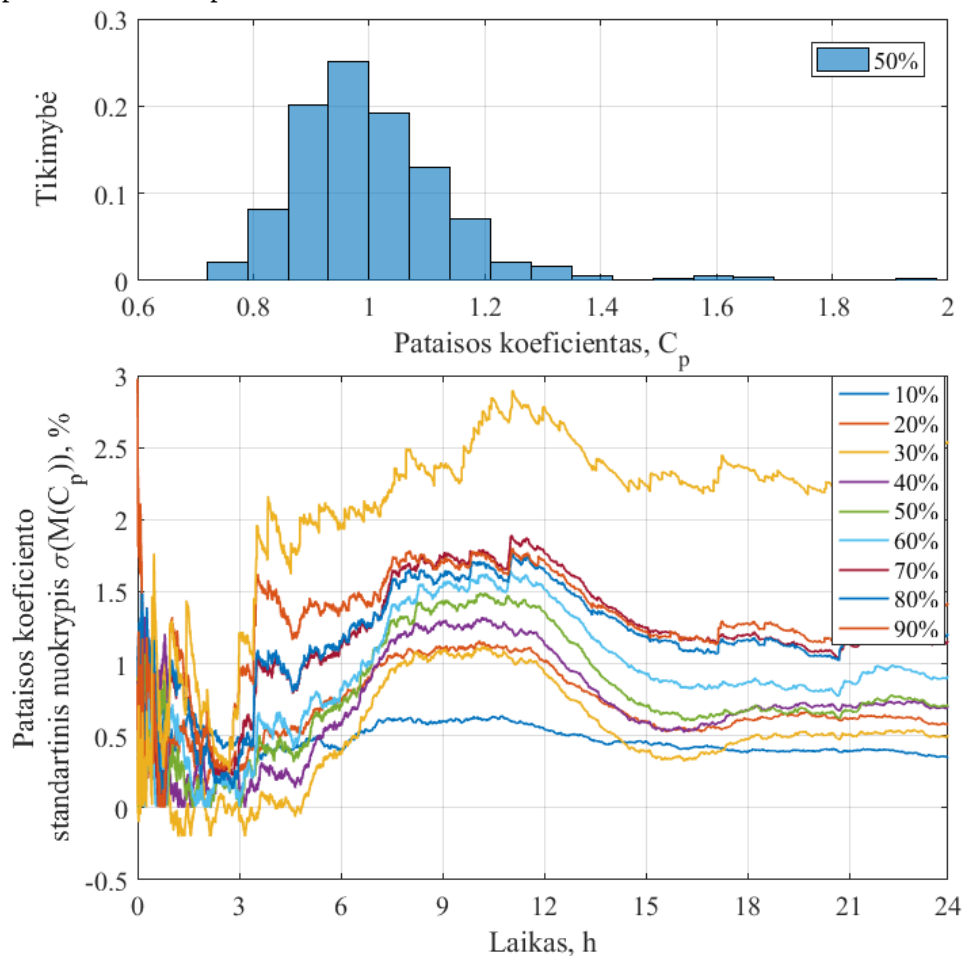
4.25 pav. Pataisos koeficiento (išraiška (40)) verčių histograma (viršutinis pav.) ir vidurkio standartinis nuokrypis, esant įvairiems duomenų aibės filtravimo slenksčiams ir vidurkinimo laikams (apatinis pav.). Duomenų aibė „SET1“

Pataisos koeficientų, įvertintų pagal (41) išraišką, verčių histograma ($R_a = 100\%$) ir vidurkio standartinio nuokrypio priklausomybė nuo R_a ir vidurkinimo laiko pavaizduota 4.26 pav.



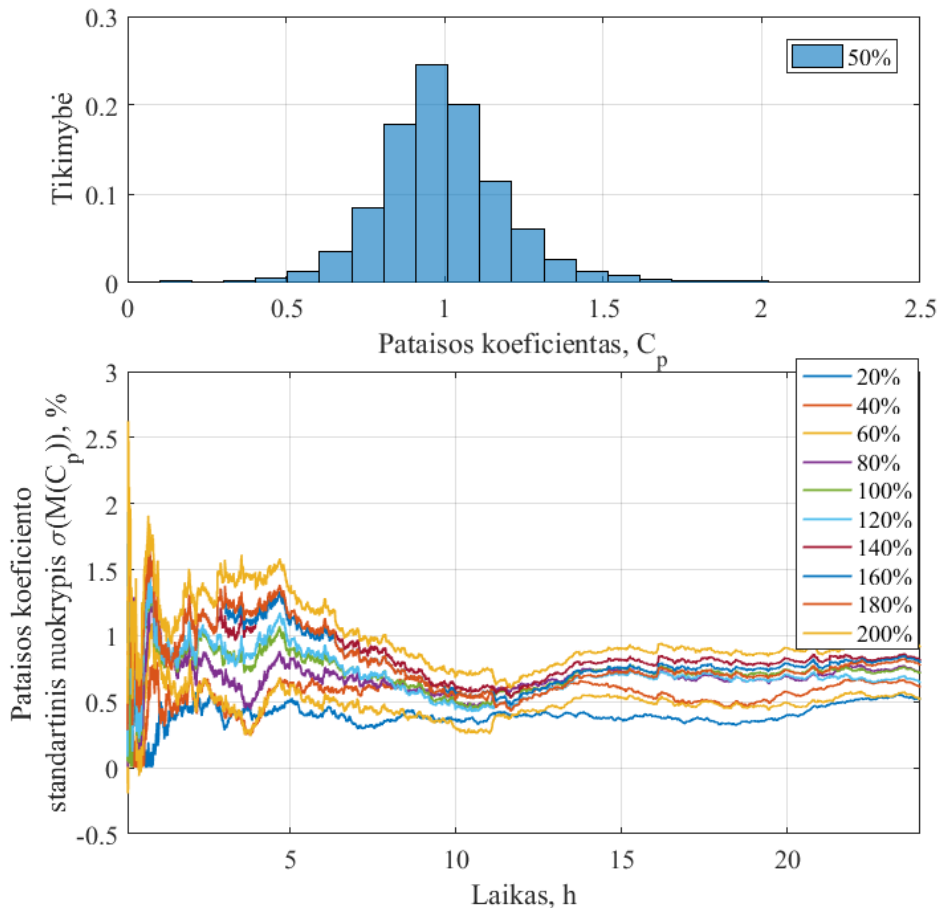
4.26 pav. Pataisos koeficiento (išraiška (41)) verčių histograma (viršutinis pav.) ir vidurkio standartinis nuokrypis, esant įvairiems duomenų aibės filtravimo slenksčiams ir vidurkinimo laikams (apatinis pav.). Duomenų aibė „SET1“

Pataisos koeficientų, įvertintų pagal (42) išraišką, verčių histograma ($R_a = 50\%$) ir vidurkio standartinio nuokrypio priklausomybė nuo R_a ir vidurkinimo laiko pavaizduota 4.27 pav.



4.27 pav. Pataisos koeficiento (išraiška (42)) verčių histograma (viršutinis pav.) ir vidurkio standartinis nuokrypis, esant įvairiems duomenų aibės filtravimo slenksčiams ir vidurkinimo laikams (apatinis pav.). Duomenų aibė „SET1“

Pataisos koeficientų, įvertintų pagal (43) išraišką, verčių histograma ($R_a = 100\%$) ir vidurkio standartinio nuokrypio priklausomybė nuo R_a ir vidurkinimo laiko pavaizduota 4.28 pav.



4.28 pav. Pataisos koeficiento (išraiška (43)) verčių histograma (viršutinis pav.) ir vidurkio standartinis nuokrypis, esant įvairiems duomenų aibės filtravimo slenksčiams ir vidurkinimo laikams (apatinis pav.). Duomenų aibė „SET1“

Iš gautų rezultatų galima matyti, kad duomenų aibės filtravimo sąlygos parinkimas taip pat daro įtaką aktyviosios galios pataisos koeficiento įvertinimui. Tačiau padaryti konkrečias išvadas, kuris iš jų yra geresnis ir kokią nufiltravimo lygį reikia naudoti gana sudėtinga. Tam reikia atlikti išsamesnius tyrimus. Šiame darbe labiau koncentruojamas dėmesys šio metodo galimybės būti pritaikytam realiomis sąlygomis įrodymui.

Atlikta duomenų aibės filtravimo analizė su 1 valandos trukmės aktyviosios galios profiliais iš duomenų aibių „SET1“ ir „SET2“. Iš kiekvienos duomenų aibės atrinkti 24 atskiri 1 valandos trukmės aktyviosios galios profiliai. Jiems panaudojus

įvairius duomenų aibės filtravimo lygmenis paskaičiuotos kiekvieno aktyviosios galios profilio pataisos koeficiento paklaidos (13 lent.). Atrinkti blogiausi pataisos koeficiento apskaičiavimo variantai (kai apskaičiuota paklaida yra maksimali) ir vidutiniai variantai (paskaičiuotas visų 24 apskaičiuotų pataisos koeficientų paklaidų vidurkis). Panaudojus duomenų aibės filtravimą su įvairiomis filtravimo sąlygomis (40) ir (41) formulėmis pateikti 13 lent., o naudojantis (42) ir (43) formulėmis pavaizduoti 14 lent.

13 lentelė. Pataisos koeficiento statistiniai įverčiai, taikant skirtingas duomenų aibės filtravimo taisykles (40) ir (42)

Duomenų aibės filtravimo slenkstis, R_a %	Nenufiltruotų pataisos koeficientų vertės, C_p	Pataisos koeficiento paklaidos naudojant duomenų aibę „SET1“				Pataisos koeficiento paklaidos naudojant duomenų aibę „SET2“			
		MEDIANA		VIDURKIS		MEDIANA		VIDURKIS	
		Blogiausias variantas, %	Vidutinis variantas, %	Blogiausias variantas, %	Vidutinis variantas, %	Blogiausias variantas, %	Vidutinis variantas, %	Blogiausias variantas, %	Vidutinis variantas, %
20	0,82–1,24	2,01	0,79	3,22	0,94	5	2,51	4,61	0,89
40	0,71–1,65	4,18	1,05	4,24	1,27	16	9,5	12,5	2,22
60	0,62–2,47	4,19	0,72	4,76	1,22	44	18	31,4	6,02
80	0,55–4,94	4,96	0,96	4,89	1,58	101	44	106,3	47,3
100	0,5–∞	111,3	20,4	45,5	9,61	378	174	338	164

14 lentelė. Pataisos koeficiento statistiniai įverčiai, taikant skirtingas duomenų aibės filtravimo taisykles (41) ir (43)

Duomenų aibės filtravimo lygis, R_a %	Nenufiltruotų pataisos koeficientų vertės, C_p	Pataisos koeficiento paklaidos naudojant duomenų aibę „SET1“				Pataisos koeficiento paklaidos naudojant duomenų aibę „SET2“			
		MEDIANA		VIDURKIS		MEDIANA		VIDURKIS	
		Blogiausias variantas, %	Vidutinis variantas, %	Blogiausias variantas, %	Vidutinis variantas, %	Blogiausias variantas, %	Vidutinis variantas, %	Blogiausias variantas, %	Vidutinis variantas, %
20	0,79–1,19	2,16	1,30	2,85	1,37	5,2	2,33	6,4	1,56
50	0,49–1,48	3,03	1,21	3,26	1,51	15,6	7,4	23,9	4,89
100	0,00–1,98	2,42	0,85	2,61	1,20	35	21	41,3	28,8
200	-0,99–2,96	2,33	0,89	2,91	1,21	65	39	76,4	45,2
300	-1,98–3,95	1,99	0,95	2,91	1,19	115	75	126	76
500	-3,95–5,93	6,18	1,41	8,33	1,69	184	112	171	102
1000	-8,89–10,8	10,5	2,12	5,86	1,88	298	154	308	142

Tarp medianos ir vidurkio skaičiavimo nesimato didelio skirtumo, taigi dėl operacijos paprastumo labiau patartina naudoti vidurkinimo operaciją. Iš 8 ir 9 lent. pavaizduotų rezultatų, duomenų aibių „SET1“ ir „SET2“ atvejais gauti rezultatai labai priklauso nuo pritaikytos duomenų aibės filtravimo sąlygos parinkimo bei filtravimo lygio. Parinkti duomenų aibės filtravimo lygį ar pačią filtravimo sąlygą nėra paprasta. Tikslas yra išsaugoti kiek įmanoma daugiau duomenų. Naudojant duomenų aibės filtravimą daroma prielaida, kad jeigu apskaičiuota pataisos koeficiento reikšmė yra didesnė nei numatytas aibės filtravimo slenkstis, vadinasi, apskaičiuota pataisos koeficiento reikšmė yra bloga. Apskaičiuojamos pataisos koeficiento reikšmės gali viršyti duomenų aibės filtravimo slenkstį dėl suvartojamos aktyvios galios šuolių tinkle. Suvartojamos aktyviosios galios šuoliai gali įvykti dėl keleto priežasčių, tokių kaip elektrinių prietaisų įjungimo ar išjungimo, ar dinaminio darbo režimo pokyčių. Duomenų filtravimo slenkstį viršijančios pataisos koeficiento reikšmės turi būti nufiltruojamos. Bet jeigu tikroji pataisos koeficiento paklaida yra didesnė nei duomenų aibės filtre yra nustatytas filtravimo slenkstis, tampa nebeįmanoma korektiškai įvertinti TM pataisos koeficiento vertę.

4.5 Aktyviosios galios pataisos koeficiento neapibrėžties analizė

Laikantis GUM rekomendacijų, standartinė apskaičiuoto TM pataisos koeficiento vidurkio $\overline{C_p}$ neapibrėžtis gali būti išreiškiama taip:

$$\begin{aligned} u^2(\overline{C_p}) = & w_{PM1}^2 u^2(\overline{P_{PM1}}) + w_{PM3}^2 u^2(\overline{P_{PM3}}) + \\ & 2r(\overline{P_{PM1}}, \overline{P_{PM3}}) w_{PM1} w_{PM3} u(\overline{P_{PM1}}) u(\overline{P_{PM3}}) + \\ & w_{TM2}^2 u^2(\overline{P_{TM2}}) + w_{TM1}^2 u^2(\overline{P_{TM1}}) + \\ & 2r(\overline{P_{TM1}}, \overline{P_{TM2}}) w_{TM2} w_{TM1} u(\overline{P_{TM2}}) u(\overline{P_{TM1}}) + \\ & 2r(\overline{P_{PM1}}, \overline{P_{TM1}}) w_{PM1} w_{TM1} u(\overline{P_{PM1}}) u(\overline{P_{TM1}}) + u^2(\overline{C_E}), \end{aligned} \quad (44)$$

čia $w_{AM1}, w_{AM3}, w_{TM1}$ bei w_{TM2} yra jautrumo koeficientai, apskaičiuoti kaip dalinės (14) formulės išvestinės atitinkamai $\overline{P_{PM1}}, \overline{P_{PM3}}, \overline{P_{TM1}}$ arba $\overline{P_{TM2}}$ atžvilgiu, $u(\overline{P_{PM1}})$ bei $u(\overline{P_{PM3}})$ – standartinės PM matavimų neapibrėžtys, $u(\overline{P_{TM2}})$ bei $u(\overline{P_{TM1}})$ – standartinės TM gautų matavimų neapibrėžtys, $r(\overline{P_{PM1}}, \overline{P_{PM3}})$, $r(\overline{P_{TM1}}, \overline{P_{TM2}})$ bei $r(\overline{P_{PM1}}, \overline{P_{TM1}})$ – koreliacijos tarp skliausteliuose pateikiamų dydžių koeficientai, $u(\overline{C_E})$ – standartinė neapibrėžtis, kylanti dėl prielaidų, padarytų išvedant (10) netiesioginio matavimo išraišką.

Standartinė PM atliekamų aktyviosios galios matavimų vidurkio neapibrėžtis yra:

$$u^2(\overline{P_{PM}}) = u_{PMRes}^2 + u_{Var}^2(\overline{P_{PM}}), \quad (45)$$

čia P_{PM} gali atitikti arba P_{PM1} , arba P_{PM3} . PM skyra neapibrėžties ir su matavimų rezultatų dispersija susijusios neapibrėžties išraiškos yra atitinkamai:

$$u_{PMRes}^2 = \frac{\Delta_{PM}^2}{12} \quad (461)$$

bei

$$u_{Var}^2(\overline{P_{PM}}) = \frac{\sigma_{VarPM}^2 + \sigma_{fPM}^2}{N}, \quad (47)$$

čia Δ_{PM} yra PM skyra vatais, σ_{VarPM} – matavimų rezultatų standartinis nuokrypis, sąlygotas PM paklaidos, σ_{fPM} – standartinis nuokrypis, sąlygotas PM išmatuojamų elektros galios fluktuacijų žemosios įtampos elektros skirstymo tinkle, N – matavimų, kurių prireikia aktyviosios galios matavimų vidurkiui apskaičiuoti, kiekis. Atsitiktinė P_{PM} matavimo sklaida, kurią apibūdiname jos vidurkio neapibrėžtimi $u_{Var}^2(\overline{P_{PM}})$, yra sąlygota: 1) paties matuoklio atsitiktinės paklaidos dedamosios, kurią apibūdiname jos standartiniu nuokrypiu σ_{VarPM}^2 , ir 2) galios fluktuacijų matavimo taške, sukeltų dėl tinkle veikiančių apkrovų trumpalaikių galios fluktuacijų, kurie apibūdinami standartiniu nuokrypiu σ_{fPM}^2 . Galios vartojimo fluktuacijomis čia laikomi jos svyravimai, kurių spektrinių dedamųjų dažnių ruožas yra aukščiau negu dažnis, kuriuo komutuojama apkrova P_s (4.18 pav.). Galimas vartojamos galios fluktuacijas žemosios įtampos skirstomajame tinkle, kurių kitimo sparta yra artima P_s

komutavimo periodui, priskiriame ne fluktuacijoms, o sistemingajai metodo paklaidai, atsirandančiai dėl prielaidos apie tinklo apkrovų pastovumą matavimo metu netikslumo.

TM išmatuotų aktyviosios galios vidurkio dispersija yra lygi:

$$u^2(\overline{P_{TM}}) = u_{TMRes}^2 + u_{Var}^2(\overline{P_{TM}}), \quad (48)$$

čia P_{TM} gali atitikti arba P_{TM2} , arba P_{TM3} . TM neapibrėžties sandas dėl skiriamosios gebos bei sandas dėl matavimų rezultatų sklaidos yra atitinkamai:

$$u_{TMRes}^2 = \frac{\Delta_{TM}^2}{12} \quad (49)$$

bei

$$u_{Var}^2(\overline{P_{TM}}) = \frac{\sigma_{VarTM}^2 + \sigma_{fTM}^2}{N}, \quad (50)$$

čia Δ_{TM} yra TM skiriamoji geba vatais, σ_{VarTM} – matavimų rezultatų standartinis nuokrypis dėl TM paklaidos, o σ_{fTM} – TM išmatuotų aktyviosios galios vartojimo standartinis nuokrypis. Atsitiktinė P_{TM} matavimo sklaida, kurią apibūdiname jos vidurkio neapibrėžtimi $u_{Var}^2(\overline{P_{TM}})$ yra sąlygota: 1) paties matuoklio atsitiktinės paklaidos dedamosios, kurią apibūdiname jos standartiniu nuokrypiu σ_{VarTM}^2 , ir 2) galios fluktuacijų matavimo taške, sukeltų dėl tinkle veikiančių apkrovų trumpalaikių vartojamas galios svyravimų, kurie apibūdinami standartiniu nuokrypiu σ_{fTM}^2 .

Dispersija $u_{Var}^2(\overline{P_{TM}})$ gali būti apskaičiuojama iš matavimo rezultatų. Tačiau būtų daug patogiau, jei vietoje eksperimentinio duomenų rinkimo tokiaime tyrimo etape būtų galima remtis matavimo priemonės specifikacija. Todėl siekiant nenuvertinti su dispersija susijusios neapibrėžties formulei, tolygiai pasiskirstanti nurodoma priemonės paklaida yra panaudojama matuoklių matavimų rezultatų sklaidos apibūdinimui:

$$\sigma_{VarPM} = \frac{e_{PM}}{\sqrt{3}}, \quad (51)$$

$$\sigma_{VarTM} = \frac{e_{TM}}{\sqrt{3}}, \quad (52)$$

kai nurodyta AM paklaida, išreikšta per matuoklio tikslumo klasę, yra

$$e_{PM} = \frac{PM \text{ tikslumo klasė}}{100\%} P_{PM}, \quad (53)$$

o nurodyta TM paklaida yra

$$e_{TM} = \frac{TM \text{ tikslumo klasė}}{100\%} P_{TM}. \quad (54)$$

Jei TM arba PM buvo kalibruoti (industrinė metrologijos sritis), tuomet matuoklio aktyviosios galios matavimų sklaida (53) formulė bei (54) formulė būtų apskaičiuojama remiantis jo kalibravimo sertifikate pateiktais duomenimis.

Santykinė standartinė neapibrėžtis C_p , išreikšta procentais iš apskaičiuoto pataisos koeficiento vidurkio, yra

$$u(C_{pr}) = \frac{u(C_p)}{C_p} \cdot 100 \%. \quad (55)$$

Eksperimentinio tyrimo [91] metu išsiaiškinta, jog viename nuosavame name aktyviosios galios standartinis nukrypimas σ_f neviršija 0,05 W, kai visi aktyviosios galios rodmenų vidurkiai, skaičiuoti 2 sekundžių intervalais, buvo išmatuoti per 1 valandą (atitinkamai, imčių skaičius $N = 1 \text{ h} / 2 \text{ s} = 1800$). Ketvirtajame skyriuje išdėstytoje analizėje panaudoti [96] šaltinyje sudaryti aktyviosios elektros galios profiliai. Remiantis ketvirtajame skyriuje pateiktais rezultatais, svyravimų vidurkio standartinis nukrypimas σ_f yra lygus 0,2 W, o maksimali užfiksuota σ_f vertė (kai kuriuose aktyvios galios profiliuose iš [94] šaltinio) buvo lygi 0,72 W, kai visi elektros galios rodmenų vidurkiai, skaičiuoti 5 sekundžių intervalais, buvo gauti per 3 valandas (atitinkamai, imčių skaičius $N = 3 \text{ h} / 5 \text{ s} = 2160$).

15 lentelėje parodomas pataisos koeficiento standartinės neapibrėžties apskaičiavimas keliais tipiniais atvejais (pirmi 5 svyravimų skaičiavimai paimti iš ketvirtojo skyriaus, kiti – iš (9)). Tipinių neapibrėžčių apskaičiavimui panaudoti realistiniai aktyviosios elektros galios suvartojimo kiekiai gyvenamosiose patalpose P_L bei elektros galios suvartojimo kiekiai potinklyje, tiekiančiame galią grupei vartotojų daugiabutyje arba keliuose nuosavuose namuose, P_{grid} . Svyravimų dydžiui įvertinti remiantis ir TM, ir PM atliktų aktyviosios galios matavimų rezultatais, pateikiami duomenys apima ir standartinio svyravimų nukrypimo santykį σ_{fMUT} arba σ_{fRM} , ir stimulo galią P_S , išreiškiamus procentais atitinkamai TM ar PM.

15 lent. pateikta dešimt atvejų padeda detaliau išnagrinėti pasiekiamą santykinę standartinę C_p neapibrėžtį, remiantis tipinėmis parametru bei dydžiu, kurie pagal (44)–(55) formules įtakoja neapibrėžtį, vertėmis. Kadangi santykinė standartinė neapibrėžtis priklauso nuo pataisos koeficiento vertės, jos vertės 15 lent. yra pateikiamos remiantis tipiškiausiu pataisos koeficiento verte $C_p = 1$.

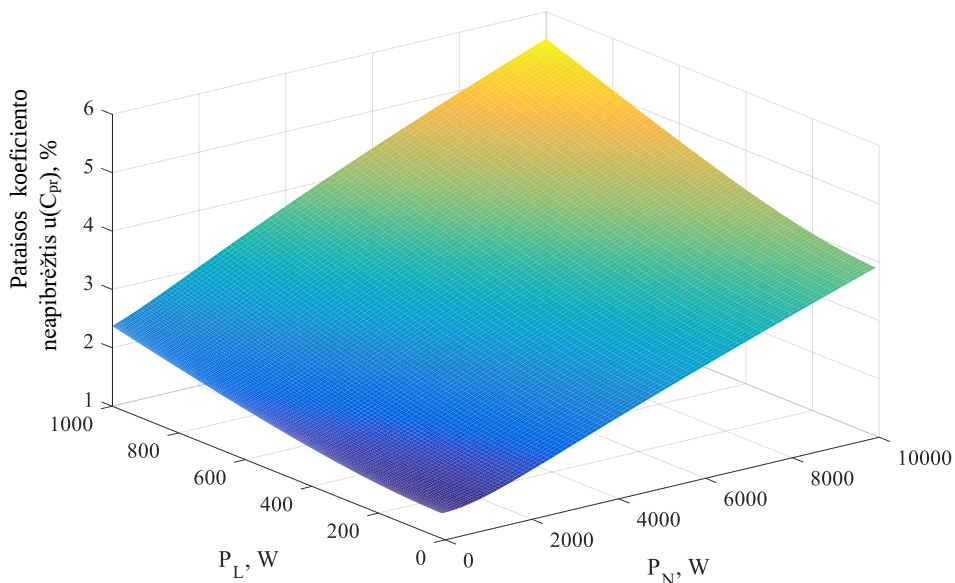
15 lentelė. Pataisos koeficiento standartinės neapibrėžties įverčiai bei jų įtakojantys veiksniai

Parametras	Atvejo nr.									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P_{grid} , kW	1	1	1	5	5	1	5	5	7,5	10
P_L , kW	0,1	0,5	0,1	0,1	0,5	0,1	0,5	1	1	1
P_S , W	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
N (aktyviosios galios imčių skaičiaus vidurkis)	2160	2160	2160	2160	2160	1800	1800	1800	1800	1800
PM tikslumo klasė	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Δ_{PM} , W	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
σ_{fRM} , W	0,2	0,2	0,2	0,6	0,6	0,2	0,2	0,6	0,2	0,2
$\frac{\sigma_{fRM}}{P_S} 100 \%$	2 %	2 %	2 %	6 %	6 %	2 %	2 %	2 %	2 %	2 %
TM tikslumo klasė	1	1	1	2	2	1	1	2	1	1
Δ_{TM} , W	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
σ_{fTM} , W	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
$\frac{\sigma_{fMUT}}{P_S} 100 \%$	2 %	2 %	2 %	2 %	2 %	0,5 %	0,5 %	2 %	0,5 %	0,5 %
$u(k_E)$, %	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
$r(\overline{P_{R1}}, \overline{P_{R3}})$	0	0	0,5	0	0	0	0	0	0	0
$r(\overline{P_{M1}}, \overline{P_{M2}})$	0	0	0,5	0	0	0	0	0	0	0
$r(\overline{P_{R1}}, \overline{P_{M1}})$	0	0	0,5	0	0	0	0	0	0	0
$u(c_{pr})$, %	4,2	4,2	3,6	9,3	9,4	3,2	3,9	4,9	5,9	6,8

Akivaizdu, kad 15 lentelėje pateikiami 4-asis bei 5-asis atvejai pasižymi daug didesne neapibrėžtimi $u(c_{pr})$, daugiausia dėl didesnių galios fluktuacijų.

Iš (48)–(58) formulių, 15 lent. bei 4.29 pav. matoma, jog standartinė santykinė neapibrėžtis $u(c_{pr})$ didėja kartu su PM matuojama tinklo elektros galia, TM matuojama kliento elektros galia bei svyravimais. Neapibrėžčiai $u(c_{pr})$ sumažinti galima padidinti elektros galios imčių kiekį N (kartu pailginant stebėjimo trukmę). Didesnis imčių skaičius padeda efektyviau slopinti elektros galios vartojimo tinkle fluktuacijas bei, remiantis (54) formule, sumažina neapibrėžtį.

Pataisos koeficiento neapibrėžties priklausomybė nuo papildomos apkrovos ir bendros vartojamos galios tinkle dydžio pavaizduota 4.29 pav.

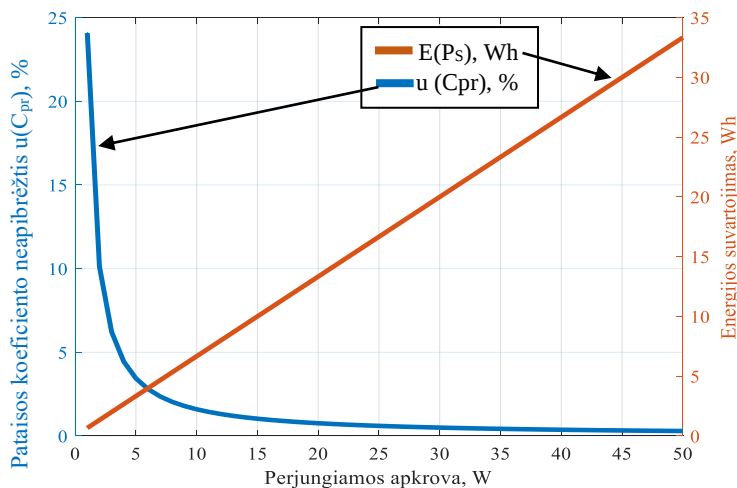


4.29 pav. Standartinė pataisos koeficiento neapibrėžties priklausomybė nuo elektros tinkle suvartojamos galios P_N bei vartotojo apkrovos P_L . Kiti parametrai paimti iš 15 lent. pateikiamo 7-ojo atvejo

Standartinė pataisos koeficiento neapibrėžties priklausomybė įvertinta taikant vienos fazės elektros vidaus instaliacijos tinklo, sudaryto iš įprastai patalpų instaliacijoje naudojamų $2,5 \text{ mm}^2$ skerspjūvio ploto varinių laidininkų kabelių, modelį; atstumas tarp PM ir TM parinktas 100 m, neįvertinant pačios tinklo konfigūracijos.

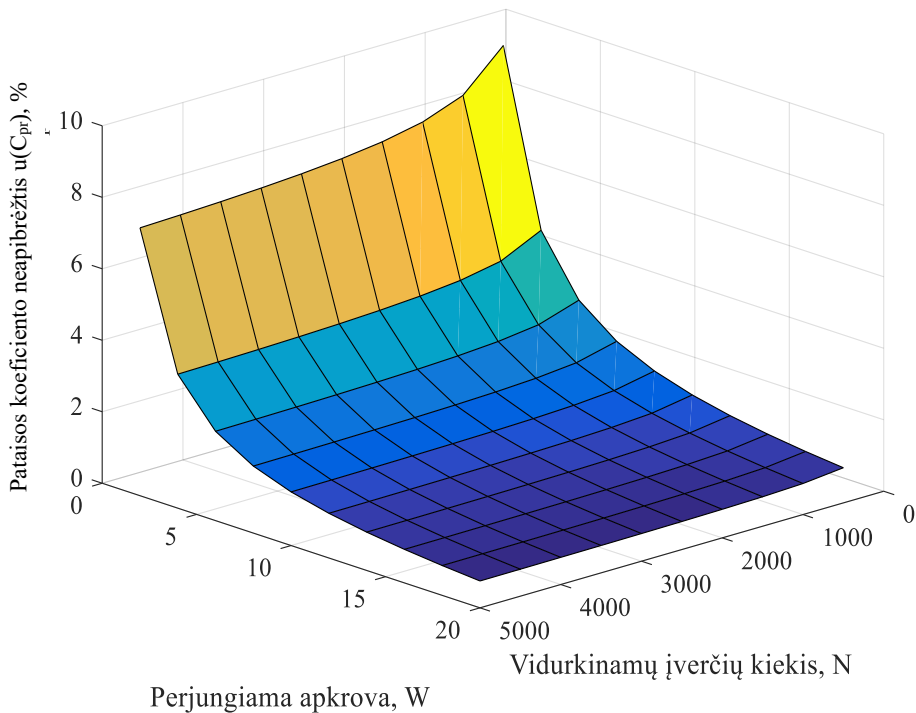
Siūlomame metode yra naudojama papildoma prijungiama apkrova, kuri prie tinklo būna prijungta $2/3$ laiko. Taigi galima gana paprastai paskaičiuoti, kiek elektros energijos per valandą suvartos papildoma apkrova, tai yra:

$$P_e = P_s \cdot \frac{2}{3}. \quad (56)$$



4.30 pav. Aktyviosios galios pataisos koeficiento neapibrėžties priklausomybė nuo perjungiamos apkrovos P_s bei perjungiamos apkrovos P_s energijos suvartojimas priklausomai nuo perjungiamos apkrovos dydžio

Kaip galima pastebėti iš 4.30 pav. ir 4.31 pav., didėjant perjungiamos apkrovos dydžiui P_s gaunama vis mažesnė pataisos koeficiento standartinė neapibrėžtis. Taigi norint gauti mažiausią standartinę neapibrėžtį geriausia būtų naudoti kaip įmanoma didesnę apkrovą P_s , tačiau tai turi savo minusų, kadangi didėjant apkrovai, tiesiškai didėja ir nuostoliai, o apkrovos dydis ir šilumos išskaidymas tampa vis didesnėmis inžinerinėmis problemomis. Todėl reikia pasirinkti pakankamai didelę apkrovą, kad PM ją vis dar galėtų išmatuoti, bei pakankamai mažą, siekiant minimizuoti pridėtinius aktyviosios galios nuostolius.



4.31 pav. Aktyviosios galios pataisos koeficiento neapibrėžties priklausomybė nuo perjungiamos apkrovos dydžio P_s bei vidurkinamų įtėrių kiekio N

TM paklaidos vertinamos ne konkrečiuose darbo taškuose, o atsitiktiniuose galios vartojimo taškuose, kurie priklauso nuo aktyviosios galios vartojimo. Todėl, siekiant sušvelninti žemosios įtampos elektros skirstymo tinkle galios nuostolių bei galios fluktuacijų įtaką neapibrėžties $u(c_{pr})$ įvertinimui, prasminga apskaičiuoti pataisos koeficientą, kai ir TM, ir PM matuojama aktyvioji galia yra mažesnė, bet vis dar nurodytame jų tikslumo diapazone. Be to, situacija, kai skirtumas tarp PM matuojamos aktyviosios galios ir TM yra mažas, yra palanki sąlyga. Kadangi tuomet kitų matuoklių matuojama aktyvioji galia nuostolius įtakoja mažiausiai, ir skirtumas tarp PM ir TM matavimo diapazonų bei elektros galios skiriamųjų gebų tampa mažesnis.

4.6 Skyriaus apibendrinimas

Realizuota eksperimentinė sistema, skirta pasiūlyto paklaidų stebėsenos metodo verifikavimui. Atliktus eksperimentinius metodo bandymus, buvo pastebėta, kad tuomet, kai elektros tinkle tarp PM ir TM elektros apkrovų kiekis yra sąlyginai nedidelis („SET1“), per 24 valandas įvertinamo pataisos koeficiento paklaida nesiekia 3 %. Didėjant apkrovų kiekiui tinkle („SET2“), kurio suvartojamą galią matuoja PM, dėl vartotojų veiklų sąlygotos intensyvesnės apkrovų dinamikos, vis dažniau

pažeidžiama pagrindinė nagrinėjamo metodo prielaida dėl vartojamos galios stabilumo paklaidos vertinimo procedūros metu. Esant tokioms sąlygoms, kai kurie TM multiplikatyviojo pataisos koeficiento įverčiai gaunami labai iškreipti (anomalijos), kurie labai blogina pataisos koeficiento vidurkio sklaidą. Tokiems pavieniams anomaliniams įverčiams atmesti (nenaudoti vidurkinant) rekomenduojama taikyti imčių filtravimo metodus. Kitas perspektyvus būdas nuotolinio TM pataisos koeficiento nustatymo paklaidų mažinimui yra laiko intervalų pasirinkimas metodo procedūrai įvykdyti, kuomet apkrovų dinamika minimali, pvz., nakties metu. Naudojant „SET2“ duomenų aibę buvo aptiktas 100 min. intervalas, kuriame pasitelkus metodą aktyviosios galios pataisos koeficientą galima buvo įvertinti su paklaida ne didesne negu 2,2 %. Ateityje tikslinga detaliau ištirti, kaip būtų galima stebėti galios tinkle suvartojimą ir priimti sprendimą vykdyti TM paklaidų stebėseną.

TM aktyviosios galios pataisos koeficiento neapibrėžties apskaičiavimui įtaką daro nuotolinio PM bei TM tikslumai, kai didžiausią poveikį jis sukelia esant trumpalaikiams elektros energijos vartojimo nežinomoje EEM jungiančioje terpėje (žemosios įtampos elektros skirstymo tinkle) lygių svyravimams. Daugiausia šiuo metu naudojamų aktyviosios energijos komercinių EEM yra 1 arba 2 klasės pagal IEC standartus. Todėl šiame darbe buvo tiriami 1 bei 2 klasės tikslumo TM pataisos koeficiento apskaičiavimas naudojant 0,2 bei 0,5 klasės PM. Didžiausia apskaičiuota TM pataisos koeficiento (kurio vardinė vertė yra 1) standartinė procentinė neapibrėžties vertė buvo lygi 9,4 %, PM fiksuojant 5 kW elektros galią bei 0,5 kW elektros galią TM vietoje (šios elektros galios reikšmės yra įprastos daugiabučiuose pastatuose). Ateities uždavinys – sukurti metodus, padedančius mažinti trumpalaikių galios svyravimų įtaką, kurią sąlygoja apkrovų galių dinamika. Vienas iš būdų išspręsti šią problemą yra ilginti stebėjimo trukmę ir skaičiuoti vidurkį iš didesnio pataisos koeficiento imčių kiekio.

IŠVADOS

1. Disertacijoje pristatytas naujas nuotolinės elektros energijos matuoklių paklaidų stebėsenos metodas, leidžiantis nuotoliniu būdu įvertinti tikrinamojo elektros energijos matuoklio aktyviosios galios paklaidas, jo neatjungiant nuo elektros tinklo bei nepertraukiant elektros tiekimo vartotojui.
2. Nagrinėjamo nuotolinės metrologinės būklės stebėsenos metodo taikymo galimybės yra: 1) teisinės metrologijos srityje, siekiant nustatyti matuoklio ar jų grupės neeilinės patikros momentą; 2) pramoninės metrologijos srityje, siekiant atlikti matuoklio rodmenų pataisą arba nustatyti matuoklio pakeitimo poreikį.
3. Pasiūlytą metodą modeliuojant kompiuteriniu būdu, kurio metu taikytas tipinis elektros skirstomojo tinklo modelis, buvo nustatyta, kad sistemingoji multiplikatyvinio pataisos koeficiento įvertinimo paklaida neviršija 0,3 %.
4. Galios fluktuacijų skirstomajame tinkle įtaka metodo tikslumui buvo iširta eksperimentiškai bei naudojant sintezuotus galios profilius. Taikant gretimų galios imčių, viršijančių 20 W atmetimo slenkstį ir imčių vidurkinimą 6 min. intervale, eksperimentiniu būdu išmatuotų aktyviosios galios fluktuacijų tipiniame žemos įtampos skirstomajame tinkle standartinis nuokrypis neviršijo 0,1 W. Apdorojant sintezuotus aktyviosios galios profilius, kurių diskretizavimo periodas 1 s, buvo nustatytas 0,2 W gretimų galios matavimų 2 s intervaluose standartinis nuokrypis, taikant vidurkinimą 3 val. intervale ir 20 W filtravimo slenkstį. Galios fluktuacijų standartinis nuokrypis įtakoja multiplikatyvinio aktyviosios galios pataisos koeficiento įvertinimo neapibrėžtį.
5. Realizavus sistemos maketą ir atliktus eksperimentinius bandymus tipiniuose pastatų elektros skirstomuosiuose tinkluose nustatyta, kad taikant daugkartinį multiplikatyvinio pataisos koeficiento įvertinimą ir vidurkinimą vienos paros intervale bei naudojant pataisos koeficiento įverčių filtravimą, metodas sudarė sąlygas pasiekti pataisos koeficiento įvertinimo atsitiktinę paklaidos dedamąją, neviršijančią 2 %.
6. Naudojant 1 ir 2 tikslumo klasės tikrinamuosius matuoklius, kurių aktyviosios galios rodmenys neviršija 0,5 kW, bei 0,2 ir 0,5 tikslumo klasės pamatinius matuoklius, kurių galios rodmenys neviršija 5 kW, nustatyta įvertinto multiplikatyvinio pataisos koeficiento neapibrėžtis neviršija 9,4 %.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. TAYMANOV, Roald. ir SAPOZHNIKOVA, Ksenoa., *Metrological self-check and evolution of metrology. Measurement*, [interaktyvus] vol. 43, no. 7, pp. 869–877, Aug. 2010 [žiūrėta 2020 m. spalio 10] Prieiga per doi: 10.1016/j.measurement.2010.04.004
2. JOSHI, Hemant, Residential, Commercial ir Industrial Electrical Systems: Network and Installation, Volume 2. Revenue and Check Metering, Chapter (McGraw Hill Education (India) Private Limited: New York, Chicago, San Francisco, Athens, London, Madrid, Mexico City, Milan, New Delhi, Singapore, Sydney, Toronto, 2008). [interaktyvus] [žiūrėta 2020 m. spalio 10] Prieiga per internetą: <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780070620971/chapter/chapter6>
3. AVANCINI, Danielly B., RODRIGUES, Joel J.P.C., Martins, SIMION G.B., RABÊLO, Ricardo A.L. Al-MUHTADI Jalal ir SOLIC, Petar, *Energy meters evolution in smart grids: A review, Journal of Cleaner Production*, [interaktyvus] 217, (2019) 702-715, [žiūrėta 2020 m. spalio 10] Prieiga per doi: 10.1016/j.jclepro.2019.01.229 .
4. ABATE, F., CARRATÙ, M., LIGUORI C., ir PACIELLO, V., *A low cost smart power meter for IoT, Measurement* [interaktyvus], vol. 136, (2019) pp. 59-66. ISSN 0263-2241 Prieiga per doi: 10.1016/j.measurement.2018.12.069.
5. European Commission, Smart grids and meters, [interaktyvus] 2018 [žiūrėta 2020 m. spalio 10] Prieiga per internetą: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/market-and-consumers/smart-grids-and-meters>.
6. DICK, Alan, In-service testing of electricity meters in the UK [interaktyvus], 2008-06-03 [žiūrėta 2020 m. spalio 10] Prieiga per internetą: <https://www.metering.com/regional-news/europe-uk/in-service-testing-of-electricity-meters-in-the-uk/>.
7. LI, Ning, YANG, Jincheng, SUN, Yongquan, WANG, Gang, ZHANG, Jiahai ir LIU, Chun. Failure Modes and Effects Analysis for Domestic Electric Energy Meter Using In-Service Data, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, (108) (2018) pp. 1-6. [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.1088/1755-1315/108/5/052036.
8. International recommendation OIML R 46-1 / R 46-2:2012. Active electrical energy meters. Part 1: Metrological and technical requirements, Part 2: Metrological controls and performance tests.
9. ISO 2859-1:1999, Sampling procedures for inspection by attributes — Part 1: Sampling schemes indexed by acceptance quality limit (AQL) for lot-by-lot inspection.
10. ISO 2859-2:1985, Sampling Procedures for Inspection by Attributes – Part 2: Sampling Plans Indexed by Limiting Quality (LQ) for Isolated Lot Inspection.
11. Welmec Guide 8.10 Measuring Instruments Directive (2004/22/EC): Guide for generating sampling plans for statistical verification according to Annex F and F1 of MID 2004/22/EC. 1, 2011.
12. Surveillance of utility meters in service on the basis of sampling inspections, OIML G 20 Edition [interaktyvus], 2017 (E). [žiūrėta 2020 m. spalio 10] Prieiga per internetą: https://www.oiml.org/en/files/pdf_g/g020-e17.pdf
13. S-02—Application of specifications for statistical sampling and measurement uncertainty in the verification and reverification of electricity and gas meters, [interaktyvus], 2018-07-01, rev. 5

- [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per internetą: <https://www.ic.gc.ca/eic/site/mc-mc.nsf/eng/lm00090.html>
14. In-service testing handbook for gas and electricity meters, [interaktyvus] Vasaris 2020 [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per internetą: <https://www.gov.uk/government/publications/in-service-testing-handbook-for-gas-and-electricity-meters>.
 15. KLAUENBERG, Katy ir ELSTER, Clemens Sampling for assurance of future reliability, [interaktyvus], 2016 Metrologia, Vol.54, No. 1. pp. 59-38 [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: <https://doi.org/10.1088/1681-7575/54/1/59>
 16. KLAUENBERG, Katy, KRAMER, Rainer, KRONER, Corinna, ROSE, Jürgen ir ELSTER, Clemens Reducing sample size by tightening test conditions. *Qual Reliab Engng Int.* [interaktyvus], 2018; 34: 333– 346. [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.1002/qre.2256.
 17. KARLSSON, Helge, OLSEN, Åge A.F. ir PENDRILL, Leslie Conformance assessment of electrical energy meters investigated by risk analysis – a case study, 2016 OIML Bulletin, Vol. 57, no 2, p. 5-20.
 18. DIRECTIVE 2014/32/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL, 26 02 2014.
 19. WELMEC Country information, [interaktyvus], Vasaris 2018, [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1002/qre.2256>. <https://www.welmec.org/welmec/country-info/>,
 20. Verification/Inspection, Japan Electric Meters Inspection Corporation (JEMIC), [interaktyvus], Vasaris 2018, [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per internetą: <https://www.jemic.go.jp/e/vi/02.html> .
 21. Department of Public Service 16 NYCRR Part 92 Operating Manual. [interaktyvus], Kovo 14, 2003 [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per internetą: <http://www.dps.ny.gov/Part92-Operating-Manual.pdf>
 22. Reverification periods for electricity meters and metering installations, An Agency of Industry Canada, [interaktyvus], 2010, [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per internetą: <https://www.ic.gc.ca/eic/site/mc-mc.nsf/eng/lm00597.html> ,
 23. SIBIYA, Morris, NAIDOO, Raj ir BANSAL, Ramesh A review of the code of practice for electricity metering to regulate smart metering and small scale embedded distributed generation, Proceedings of the SAIEE Smartgrid Conference, Midrand, South Africa, [interaktyvus], Rugsėjis 2017. [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per internetą: <https://az817975.vo.msecnd.net/wm-418498-cmsimages/Paper1-Day1-AReviewoftheCodeofPracticeforElectricity.pdf>
 24. AMICONE, D., BERNIERI, A., Ferrigno, L., ir LARACCA M., A smart add-on device for the remote calibration of electrical energy meters, Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2009. I2MTC'09. Singapore, [interaktyvus], (2009) pp. 1599-1604. [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.1109/IMTC.2009.5168710.
 25. JEBRONI, Zakariae, CHADLI, Hajar, CHADLI, Elhassane ir TIDHAF, Belkasssem, Remote calibration system of a smart electrical energy meter. *J. Electr. Syst.* 2017, 13, 806–823.
 26. SASHO, Andonov ir CUNDEVA-BLAJER, Marija. Calibration for Industry 4.0 Metrology: Touchless Calibration, IMEKO World Congress XXII Proceedings, 2018.
 27. SANDRIĆ, Bruno ir JURČEVIĆ, Marko Metrology and quality assurance in internet of things, 2018 First International Colloquium on Smart Grid Metrology (SmaGriMet), Split, 2018, pp. 1-6, [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.23919/SMAGRIMET.2018.8369849.

28. TAYMANOV Roald , SAPOZHNIKOVA Kseniia , ir IONOV Anton Topical Metrology Problems in the Era of Cyber-physical Systems and Internet of Things, 18th Int. Congr. Metrol., vol. 09006, p. 09006, 2017. [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per internetą: https://cfmetrologie.edpsciences.org/fr/articles/metrology/pdf/2017/01/metrology_metr2017_09006.pdf
29. SEPPA, H. Method and System for the Calibration of Meters, WIPO Patent Application WO/2007/063180 Publication [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per internetą: <http://www.freepatentsonline.com/WO2007063180.html> .
30. KORHONEN, A. Verification of energy meters using automatic meter reading data, Aalto University Master thesis 2012.
31. KONG, Xiangyu, MA, Yuying; ZHAO, Xin, LI, Ye ir TENG, Yongxing. A Recursive Least Squares Method with Double-Parameter for Online Estimation of Electric Meter Errors. Energies 2019, 12, 805. [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.3390/en12050805
32. YIP, Sook-Chin, WONG KokSheik, HEW, Wooi-Ping, GAN, Ming-Tao, PHAN, Raphael C.-W., ir TAN, Su-Wei, Detection of energy theft and defective smart meters in smart grids using linear regression, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, . [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.1016/j.ijepes.2017.04.005
33. YIP, Sook-Chin, TAN Wooi-Nee, TAN, ChiaKwang, GAN, Ming-Tao ir WONG, KokSheik, An anomaly detection framework for identifying energy theft and defective meters in smart grids, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 101, 2018, pp. 189-203, [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.1016/j.ijepes.2018.03.025 .
34. HENRIQUES, H.O., CORRÊA, R.L.S., FORTES, M.Z. ir BORBA, B.S.M.C., ir FERREIRA, V.H., Monitoring Technical Losses to Improve Non-Technical Losses Estimation and Detection in LV Distribution Systems, Measurement, [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.1016/j.measurement.2020.107840
35. WALKER, George, Multi-Tenant Meter Data Management - A Systems Approach to Hierarchical Value, NRECA-DOE Smart Grid Final project report. 2014-05-31 [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per internetą: https://www.smartgrid.gov/files/NRECA_DOE_MDM.pdf.
36. BLAZAKIS, Konstantinos, DAVARZANI, Sima, STAVRAKAKIS, Gergios ir PISICA, Ioana, Lessons Learnt from Mining Meter Data of Residential Consumers. Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science. 60(4), pp. 266-272, 2016 31 [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per internetą: <https://pp.bme.hu/eecs/article/view/9993>
37. LI, Beibei, LU, Rongxing, ir XIAO, Gaoxi, HMM-Based Fast Detection of False Data Injections in Advanced Metering Infrastructure, GLOBECOM 2017 - 2017 IEEE Global Communications Conference, Singapore, 2017, pp. 1-6, [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.1109/GLOCOM.2017.8254498.
38. ZHAI, Zhiqiang (John) r SALAZAR, Andrea Assessing the implications of sub-metering with energy analytics to building energy savings, Energy and Built Environment, 1, (1) (2020) 27-35, [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.1016/j.enbenv.2019.08.002.
39. Electricity Metering Code, EMTC/08 2013- 02, [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per internetą: <https://www.escosa.sa.gov.au/ArticleDocuments/613/130131-ElectricityMeteringCode-EMTC08.pdf.aspx?Embed=Y>

40. Electricity industry act 2004, Electricity industry (metering) code 2012, State of Western Australia, [interaktyvus], žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per internetą: [https://www.slp.wa.gov.au/gazette/gazette.nsf/0/12CD08688E37922E48257ACC00233250/\\$file/gg225.pdf](https://www.slp.wa.gov.au/gazette/gazette.nsf/0/12CD08688E37922E48257ACC00233250/$file/gg225.pdf)
41. Metrology Procedure for Metering Installations on the Western Power Network. 2015 - 05 <https://westernpower.com.au/media/1515/metrology-procedure-for-metering-installations-network.pdf>.
42. Energy Metering IC with Sensor Monitoring and Autocalibration ADE9153A, Datasheet 2/2018 [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per internetą: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADE9153B.pdf>.
43. Nexus 1500+ Next Generation Power Quality Revenue Meter, [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per internetą: https://electroind.com/product-info/nexus-1500_plus-next-generation-power-quality-revenue-meter/
44. RIBNIKAR, Rok, BIZJAK, Uroš ir STRLE, Drago, Efficient built-in selftest of a high-precision electronic watt-hour meter. Informacije MIDEM 41 (2011) 3, Ljubljana, 2011, pp. 222-228, [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per internetą: [http://www.midem-drustvo.si/Journal%20papers/MIDEM_41\(2011\)3p222.pdf](http://www.midem-drustvo.si/Journal%20papers/MIDEM_41(2011)3p222.pdf)
45. RIBNIKAR, Rok, ir STRLE, Drago, Off-line BIST in watt hour meters, 9th Conference on Ph.D. Research in Microelectronics and Electronics (PRIME), Villach, 2013, pp. 109-112, [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.1109/PRIME.2013.6603120.
46. TCTF Guidelines for Remote Calibration. Technical Committee on Time and Frequency, 2012-07-10, 10 p. [interaktyvus], žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per internetą: http://www.apmpweb.org/fms/get_file.php?index=MTcyMg.
47. JURČEVIĆ, Marko, BORSIĆ, Mladen, MALARIĆ, Roman ir HEGEDUŠ, Hrvoje, Internet-Enabled Calibration Services: Design of a Secure Calibration System, IEEE Trans. Instr. Meas., 57 (9) (2008) 2012-2018, [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.1109/TIM.2008.919019.
48. NAKUTIS, Žilvinas et. al., A Short-term Power Fluctuations Averaging in Low Voltage AC Grid, 2017 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS), Liverpool, pp. 1-5, [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.1109/AMPS.2017.8078347.
49. AN2867 Application note „Oscillator design guide for STM8AF/AL/S, STM32 MCUs and MPUs“ 2020 12, [interaktyvus], žiūrėta 2021 m. Kovo 10]. Prieiga per internetą: https://www.st.com/resource/en/application_note/cd00221665-oscillator-design-guide-for-stm8afals-stm32-mcus-and-mpus-stmicroelectronics.pdf
50. SATEC (Australia) Pty Ltd „Electricity metering accuracy explained“ 2014 10 02 [interaktyvus], žiūrėta 2021 m. Kovo 10]. Prieiga per internetą: <https://www.ecdonline.com.au/content/electrical-distribution/article/electricity-metering-accuracy-explained-372339275#axzz6q8mFQkiu>
51. HAN, Jinsoo, JEONG, Jin-Doo, LEE, Ilwoo ir KIM, Sang-Ha. Low-cost monitoring of photovoltaic systems at panel level in residential homes based on power line communication, in *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 63, no. 4, pp. 435-441, Lapkritis 2017. [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.1109/TCE.2017.015074.
52. JIN, Zongshuai ir ZHANG, Hengxu, Noise characteristics and fast filtering of synchronized frequency measurement in low voltage grid 2016 IEEE Smart Energy Grid Engineering (SEGE), Oshawa, ON, 2016, pp. 398-403, [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.1109/SEGE.2016.7589559.

53. STASTNY, Ladislav, FRANEK, Leseck, BRADAC, Zdenek, Time Synchronized Low-Voltage Measurements for Smart Grids, 25th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, Procedia Engineering 100 (2015) p.p. 1389 – 1395. [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.1016/j.proeng.2015.01.508
54. VON MEIER, Alexandra, STEWART, Emma, MCEACHERN, Alex, MEHRMANESH, Laura, Precision Micro- Synchrophasors for Distribution Systems: A Summary of Applications, in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 8, no. 6, pp. 2926-2936, Nov. 2017. [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.1109/TSG.2017.2720543.
55. JIN, Zongshuai, ZHANG, Hengxu ir LI, Changang, WAMS light and its deployment in China, 2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), Changsha, 2015, pp. 1373-1376. [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.1109/DRPT.2015.7432445
56. ANDREADOU, Nikoleta, GUARDIOLA, Miguel O., FULLI, Gianluca, Telecommunication Technologies for Smart Grid Projects with Focus on Smart Metering Applications, *Energies* 2016, 9, 375. [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.3390/en9050375
57. PINTE, Bogdan, QUINLAN, Michael ir REINHARD, Karl "Low voltage micro-phasor measurement unit (μ PMU)," *2015 IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI)*, Champaign, IL, 2015, pp. 1-4. [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.1109/PECI.2015.7064888.
58. RINALDI, Stefano, DELLA GIUSTINA, Davide, FERRARI, Paolo, FLAMMINI, Alessandra, SISINNI, Emiliano, Time synchronization over heterogeneous network for smart grid application: Design and characterization of a real case, *Ad Hoc Networks*, Vol. 50, 2016, pp. 41-57. [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.1016/j.adhoc.2016.04.001
59. IEEE1159 - IEEE recommended practice for monitoring electric power quality, vol. 2009, no. June. 2009.
60. NAKUTIS, Žilvinas, SAUNORIS, Marius, RAMANAUSKAS, Ramūnas, DAUNORAS, Vytautas, LUKOČIUS, Robertas ir MARČIULIONIS, Povilas, A Method for Remote Estimation of Wattmeter's Adjustment Gain, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 68, Nr. 3, p. 713–721, 2019 - 03, {interaktyvus}, [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.1109/TIM.2018.2857118
61. SOUSSI, Souha, RHOUMA, Ons B. ir REBAI, Chiheb, Measurement platform of mains zero crossing period for powerline communication *2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings*, Montevideo, 2014, pp. 45-50. . [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.1109/I2MTC.2014.6860520.
62. KISTNER, Timo, BAUER, Michael, HETZER, Andreas DOSTERT, Klaus, Analysis of zero crossing synchronization for OFDM-based AMR systems 2008 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, Jeju City, 2008, pp. 204-208. [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.1109/ISPLC.2008.4510424.
63. STASTNY, Ladislav, FRANEK, Leseck, JIRGL, Miroslav, MISIK, Stefan ir BRADAC, Zdenek, Time Synchronization in Power-line Communication, *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 4, pp. 83–88, 2015. [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.1016/j.ifacol.2015.07.012
64. CANO, Cristina, PITTOLO, Alberto, MALONE, David, LUTZ, Lampe, TONELLO, Andrea M. ir DABAK, Anand G., State of the Art in Power Line Communications: From the Applications to the Medium, in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 34, no. 7, pp. 1935-1952, July 2016. [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.1109/JSAC.2016.2566018

65. GADERER, Georg, LOSCHMIDT, Patrick, SAUTER, Thilo ir BUMILLER, Gerd Investigations on fault tolerant clock synchronization within a powerline communication structure, 2006 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, 2006, pp. 178-183. [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.1109/ISPLC.2006.247457
66. FENG, Ping, WU, Guichen, LI, Gun ir BAI, Yan Study of a New Time Transfer Method of Low Voltage Power Line, 2007 IEEE International Frequency Control Symposium Joint with the 21st European Frequency and Time Forum, Geneva, 2007, pp. 823-826 [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.1109/FREQ.2007.4319191
67. IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems - Redline," in *IEEE Std 1588-2008 (Revision of IEEE Std 1588-2002) - Redline*, pp.1-300, July 24 2008.
68. GADERER, Geog, SAUTER, Thilo ir BUMILLER, Gerd Clock synchronization in powerline networks, *International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*, 2005., 2005, pp. 71-75. [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.1109/ISPLC.2005.1430468
69. IEEE Standard Profile for Use of IEEE 1588 Precision Time Protocol in Power System Applications," in *IEEE Std C37.238-2017 (Revision of IEEE Std C37.238-2011)* , vol., no., pp.1-42, June 19 2017.
70. RINALDI, Stefano. et.al., NB PLC and Software Defined Networking for Smart Grid Applications, 2017 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS), Liverpool, 2017, pp. 1-6. [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.1109/AMPS.2017.8078348
71. MEKKI, Kais, BAJIC, Eddy, CHAXEL, Frederic ir MEYER, Fernand, A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment, *ICT Express* (2018), [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.1016/j.icte.2017.12.005 .
72. SINHA, Rashmi S., WEI, Yiqiao ir HWANG, Seung-Hoon, Survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT, *ICT Express*, vol. 3, iss. 1, 2017, pp. 14-21. [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.1016/j.icte.2017.03.004
73. QIU, Tie, ZHANG, Yushuang, QIAO, Daji, ZHANG, Xiaoyun, WYMORE, Mathew L., ir SANGAIAH, Arun Kumar, A Robust Time Synchronization Scheme for Industrial Internet of Things, in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.1109/TII.2017.2738842.
74. RIZZI, Mattia, FERRARI, Paolo, FLAMMINI, Alessandra ir SISINNI, Emiliano, Evaluation of the IoT LoRaWAN Solution for Distributed Measurement Applications, in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 66, no. 12, pp. 3340-3349, Dec. 2017. [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.1109/TIM.2017.2746378
75. Huawei and Janz Ce announce the first electrical energy smart meter based on NB-IoT 5G Spectrum recommendations (press release), Janz Ce, 2016-11-14, pp. 1-3. [interaktyvus], žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per internetą: <https://www.huawei.com/en/news/2016/11/First-Smart-Electrical-Energy-Meter-NB-IOT>
76. Herrfors Nät-Verkkö and Kamstrup pioneers NB-IoT in Finnish smart metering, 2018 05. . [interaktyvus], žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per internetą: <https://www.kamstrup.com/en/news-and-events/news/herrfors-nat-verkko-pioneers-nb-iot-in-smart-metering>
77. Narrowband-IoT: pushing the boundaries of IoT (white paper), Vodacom, September 2017, pp. 1-12.: [interaktyvus], žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per internetą:

<https://www.vodafone.com/business/news-and-insights/white-paper/narrowband-iot-pushing-the-boundaries-of-iot>

78. RATASUK, Rapeepat, MANGALVEDHE, Nitin, ZHANG, Yanji, ROBERT, Michel ir KOSKINEN, Jussi-Pekka Overview of narrowband IoT in LTE Rel-13, *2016 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*, Berlin, 2016, pp. 1-7. [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.1109/CSCN.2016.7785170
79. LANDSTRÖM, Sara, BERGSTRÖM, Joakim, WESTERBERG, Erik ir HAMMARWALL, David NB- IoT: A Sustainable Technology for Connecting Billions of Devices, in *Ericsson Technology Review*, vol. 93, no.3, April 22 2016, pp.1-12. [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per internetą: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/ericsson-technology-review/articles/nb-iot-a-sustainable-technology-for-connecting-billions-of-devices>
80. PENNACCHIONI, Marco, BENEDETTE, Maria-Gabriella, PECORELLA, Tommaso, CARLINI, Camillo ir OBINO, Pietro, NB-IoT system deployment for smart metering: Evaluation of coverage and capacity performances, *2017 AEIT International Annual Conference*, Cagliari, 2017, pp. 1-6, [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.23919/AEIT.2017.8240561
81. MALIK, Hassan, PERVAIZ, HARIS, MAHTHAB ALAM, Muhammad, MOULLEC, Yannick, KUUSIK, Alar ir IMRAN, Muhammad Ali, Radio Resource Management Scheme in NB-IoT Systems, in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 15051-15064, 2018. [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.1109/ACCESS.2018.2812299
82. LI, Yuke, CHENG, Xiang, CAO, Yang, WANG, Dexin ir YANG, Liuqing, Smart Choice for the Smart Grid: Narrowband Internet of Things (NB-IoT) in *IEEE Internet of Things Journal*. [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.1109/JIOT.2017.2781251.
83. GRANELLI, Fabrizio, DOMENICONI, Davide, FONSECA, Nelson L.S., ir TSETSGEE, Tsetsgee, On the Usage of WiFi and LTE for the Smart Grid, *2014 7th International Conference on Ubi-Media Computing and Workshops*, Ulaanbaatar, 2014, pp. 1-5. [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.1109/U-MEDIA.2014.49
84. LÉVESQUE, Martin ir TIPPER, David, A Survey of Clock Synchronization Over Packet-Switched Networks, in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 4, pp. 2926-2947, Fourthquarter 2016. . [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.1109/COMST.2016.2590438
85. MAHMOOD, Aneeq, EXEL, Reinhard ir SAUTER, Thilo, Delay and Jitter Characterization for Software-Based Clock Synchronization Over WLAN Using PTP, in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 10, no. 2, pp. 1198- 1206, May 2014 [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.1109/TII.2014.2304413
86. POMILIO, Jos Antenor ir DECKMANN, Sigmar M., Characterization and compensation of harmonics and reactive power of residential and commercial loads, *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 22, no. 2, pp. 1049–1055, Apr. 2007. [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.1109/TPWRD.2007.893179
87. VENKATESH, C., KUMAR, D., SARMA, D.V., ir SYDULU, M. (2018) Modelling of nonlinear loads and estimation of harmonics in industrial distribution system, in *Proc. 15th Nat. Power Syst. Conf. (NPSC)*, Mumbai, Maharashtra, Dec. 2008, pp. 592–597. [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per internetą: <https://www.semanticscholar.org/paper/Modelling-of-Nonlinear-Loads-and-Estimation-of-in-Venkatesh-Kumar/4ad3fe80e68e348f629f8de720580234da2a388c>
88. CHEN, Xing-ying, LU, Xiao-jing ir YU, Kun, Studies on the influence of loads on voltage stability in the urban power grid, *CICED 2010 Proceedings*, Nandzingas, 2010, p. 1–7.

- [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5736109>
89. LST EN 50160:201 Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks 2010 m. liepos 30 d. [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per internetą: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/clc/18a86a7c-e08e-405e-88cb-8a24e5fedde5/en-50160-2010>
 90. IEEE 1159:2009, Standard IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, p. 81, 2009 m. birželio 26 d. [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.1109/IEEESTD.2009.5154067
 91. MASOUM, Mohammad ir FUCHS, Ewald, Power Quality in Power Systems and Electrical Machines, Chapter 1. „Introduction to Power Quality“. 2nd Edition, Elsevier Inc. 2015.
 92. TJADEN, Tjarko, BERGNER, Joseph, WENIGER, Johannes ir QUASCHNING, Volker, Representative electrical load profiles of residential buildings in Germany with a temporal resolution of one second, HTW Berlin – University of Applied Sciences, License: CC-BY-NC-4.0, duomenų rinkinys, Berlynas, 2015.
 93. PIPATTANASOMPORN, Manisa, KUZLU, Murat, RAHMAN, Saifur ir TEKLU, Yonael, Load Profiles of Selected Major Household Appliances and Their Demand Response Opportunities, IEEE Transactions on Smart Grid, 5, Nr. 2, p. 742–750, 2014 m. kovas. [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.1109/TSG.2013.2268664
 94. ISSI, Fatih ir KAPLAN, Orhan, The Determination of Load Profiles and Power Consumptions of Home Appliances Energies, 2018, 11(3), 607. [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.3390/en11030607
 95. RAMÍREZ-Mendiola, José Luis, GRÜNEWALD, Philipp, EYRE, Nick, The diversity of residential electricity demand – A comparative analysis of metered and simulated data, Energy and Buildings, 151, 2017, p. 121–131. [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.1016/j.enbuild.2017.06.006.
 96. PFLUGRADT, Noah ir MUNTWYLER, Urs, Synthesizing residential load profiles using behavior simulation, Energy Procedia, 122, 2017, p. 655–660. [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.1016/j.egypro.2017.07.365
 97. LUKOČIUS, Robertas, NAKUTIS, Žilvinas, DAUNORAS, Vytautas, DELTUVA, Ramūnas, KUZAS, Pranas, RAČKIENĖ, Roma, An Analysis of the Systematic Error of a Remote Method for a Wattmeter Adjustment Gain Estimation in Smart Grids, Energies 12 (1: 37) (2019), [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.3390/en12010037
 98. MA, Xiao, LI, Husheng, ir DJOUADI, Seddik, Stochastic modeling of short-term power consumption for smart grid: A state space approach and real measurement demonstration, 2011 45th Annual Conference on Information Sciences and Systems, Baltimorė, disertacija, 2011, p. 1–5. [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per doi: 10.1109/CISS.2011.5766246
 99. Simple Network Time Protocol (SNTP) . [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. spalio 10]. Prieiga per internetą: <https://tools.ietf.org/html/rfc1769> .

100. STMicroelectronics „STPM32, STPM33, STPM34 datasheet“ [interaktyvus], [žiūrėta 2021 m. kovo 25]. Prieiga per internetą:
<https://www.st.com/resource/en/datasheet/stpm32.pdf>
101. LATIERS, Arnaud, JAEGER, Emmanuel, LEONARD, Cedric, MEURS, Louise, ROCHET, Jonathan, SAUSSEZ, Cédric, Residential demand management and distribution grid impact assessment, 23rd International Conference on Electricity Distribution, Lyon, 15-18 June 2015

PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS

Clarivate Analytics Web of Science pagrindinio sąrašo leidiniuose

1. NAKUTIS, Žilvinas; KAŠKONAS, Paulius; SAUNORIS, Marius; **DAUNORAS, Vytautas**; JURČEVIČ, Marko. A framework for remote in-service metrological surveillance of energy meters // Measurement. Oxford : Elsevier. ISSN 0263-2241. 2021, vol. 168, art. no. 108438, p. 1-10. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108438.

2. LUKOČIUS, Robertas; NAKUTIS, Žilvinas; **DAUNORAS, Vytautas**; DELTUVA, Ramūnas; KUZAS, Pranas; RAČKIENĖ, Roma. An analysis of the systematic error of a remote method for a wattmeter adjustment gain estimation in smart grids // Energies. Basel : MDPI AG. eISSN 1996-1073. 2019, vol. 12, iss. 1, art. no. 37, p. 1-26. DOI: 10.3390/en12010037.

3. NAKUTIS, Žilvinas; SAUNORIS, Marius; RAMANAUSKAS, Ramūnas; **DAUNORAS, Vytautas**; LUKOČIUS, Robertas; MARČIULIONIS, Povilas. A method for remote estimation of wattmeter's adjustment gain // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. Piscataway, NJ : IEEE. ISSN 0018-9456. eISSN 1557-9662. 2019, vol. 68, iss. 3, p. 713-721. DOI: 10.1109/TIM.2018.2857118.

Kituose Clarivate Analytics Web of Science duomenų bazėse referuojamuose leidiniuose [Proceedings ir kt.]

1. **DAUNORAS, Vytautas**; NAKUTIS, Žilvinas; JONKUS, Raimondas. Short-duration electrical power fluctuations suppression by averaging in low voltage distribution grid // 2nd international colloquium on smart grid metrology, SMAGRIMET 2019, Split, Croatia, April 9-12, 2019: proceedings / editors: Branimir Ivšić, Goran Petrović, Martin Dadić. Zagreb ; Piscataway, NJ : University of Zagreb ; IEEE, 2019. ISBN 9781728119663. eISBN 9789531842464. p. 1-5. DOI: 10.23919/SMAGRIMET.2019.8720388.

2. NAKUTIS, Žilvinas; KUZAS, Pranas; RYBELIS, Tadas; GRIMAILA, Vitas; **DAUNORAS, Vytautas**. A technique of synchronization of distributed energy measurement in low voltage electrical grid // IEEE 9th International workshop on applied measurements for power systems (AMPS), 26-28 September 2018, Bologna, Italy. Piscataway, NJ : IEEE, 2018. ISBN 9781538653760. eISBN 9781538653753. ISSN 2473-1315. eISSN 2475-2304. p. 1-6. DOI: 10.1109/AMPS.2018.8494885.

3. NAKUTIS, Žilvinas; SAUNORIS, Marius; **DAUNORAS, Vytautas**; LUKOČIUS, Robertas; MARČIULIONIS, Povilas; DELTUVA, Ramūnas; Ramanauskas, Ramūnas. A short-term power fluctuations averaging in low voltage AC grid // 2017 IEEE international workshop on applied measurements for power

systems (AMPS), September 20-22, 2017, Liverpool, UK: proceedings. Piscataway, NY : IEEE, 2017. ISBN 9781538603444. eISBN 9781538603437. p. 151-156. DOI: 10.1109/AMPS.2017.8078347.

4. NAKUTIS, Žilvinas; SAUNORIS, Marius; RAMANAUSKAS, Ramūnas; **DAUNORAS, Vytautas**. A method for remote wattmeter calibration // International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 22-25 May 2017, Turin, Italy. Piscataway, NJ : IEEE, 2017. ISBN 9781509035977. eISBN 9781509035960. p. 659-663. DOI: 10.1109/I2MTC.2017.7969766.

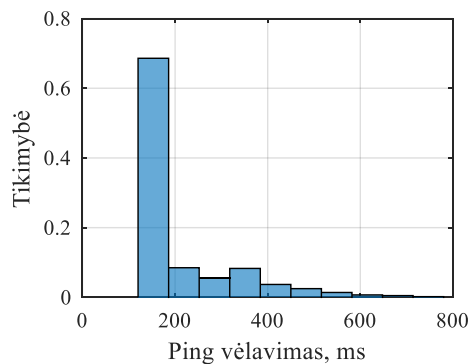
Kituose recenzuojamuose mokslo leidiniuose

Konferencijų pranešimų medžiagoje

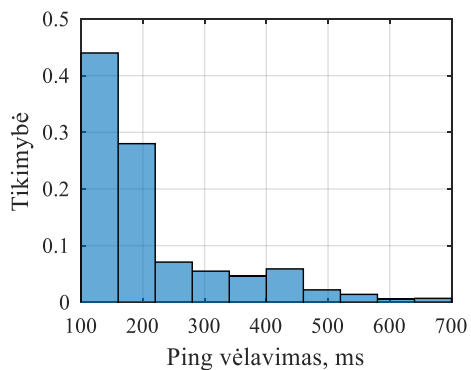
1. NAKUTIS, Žilvinas; **DAUNORAS, Vytautas**; RYBELIS, Tadas; KUZAS, Pranas; JASIŪNAS, Kipras. Clock synchronization accuracy of power line communication connected devices: a case study // Proceedings of 2020 3rd international colloquium on intelligent grid metrology (SMAGRIMET 2020): virtual event from Croatia, October 20-23, 2020 / B. Ivšić, G. Petrović, M. Dadić (eds.). Zagreb ; Piscataway, NJ : University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing; IEEE, 2020. ISBN 9781728165950. eISBN 9789531842655. p. 1-6. DOI: 10.23919/SMAGRIMET48809.2020.9264016.

PRIEDAI

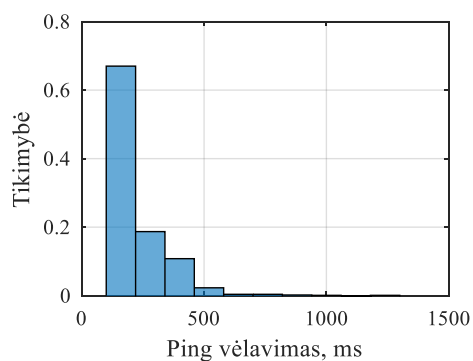
1 PRIEDAS



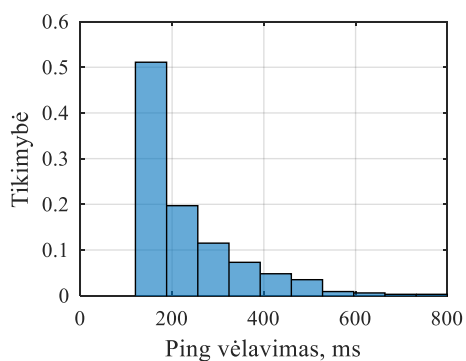
1 pav. *Ping* procedūros duomenų paketų vėlavimas universiteto pastate (naudojant eksperimentinę sistemą E1)



2 pav. *Ping* procedūros duomenų paketų vėlavimas universiteto pastate (naudojant eksperimentinę sistemą E2)



3 pav. *Ping* procedūros duomenų paketų vėlavimas universiteto pastate (naudojant eksperimentinę sistemą E3)



4 pav. *Ping* procedūros duomenų paketų vėlavimas universiteto pastate (naudojant eksperimentinę sistemą E4)

SL344. 2021-05-18, 14,25 leidyb. apsk. l. Tiražas 12 egz. Užsakymas 134.
Išleido Kauno technologijos universitetas, K. Donelaičio g. 73, 44249 Kaunas
Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas

